SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ivan Višić**

Zagreb, 2013. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# POBOLJŠANJE OTPORNOSTI BRODA NA SUDAR PRIMJENOM SANDWICH KONSTRUKCIJE

Mentor: Student:

. Višić Ivan

doc.dr. sc. Smiljko Rudan , dipl. ing.

Zagreb, 2013. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu te uz vodstvo mentora prof.dr.sc. Smiljka Rudana.

Zahvaljujem se svom mentoru, Smiljku Rudanu na pomoći, pristupačnosti i savjetima tijekom izrade završnog rada.

Zahvaljujem se kolegici Blanki Aščić, na danim modelima i savjetima koji su mi pomogli u izradi završnog rada.

Zahvaljujem se svojim roditeljima na podršci i strpljenju tijekom dosadašnjeg školovanja.

Ivan Višić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije



| Sveučilište u Zagreb<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
|---|---|
| Datum | Prilog |
| Klasa: | |
| Ur.broj: | |

# ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Mat. br.:

Naslov rada na hrvatskom jeziku:

Naslov rada na engleskom jeziku:

Opis zadatka:

Zadatak zadan: Rok predaje rada: Predviđeni datumi obrane:

Zadatak zadao: Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

# SADRŽAJ

# POPIS SLIKA

# POPIS TABLICA

# POPIS OZNAKA

| **Oznaka** | **Jedinica** | **Opis** |
|---|---|---|
| $E$ | $N/mm^2$ | Youngeov modul elastičnosti |
| $\delta$ | m | Vektor nepoznatih čvornih pomaka |
| $F$ | N | Vektor poznatih sila u čvorovima |
| $\rho$ | $kg/m^3$ | Gustoća |
| VY | m/s | Brzina u smjeru osi y referentnog čvora |
| A | $m^2$ | Površina |
| $\Delta$ | m | Istisnina broda |
| ACCY | $m/s^2$ | Ubrzanje u smjeru osi y u referentnom čvoru |
| $\varepsilon_f$ | | Kriterij popuštanja |
| t | mm | Debljina elementa |
| l | mm | Prosječna veličina elementa |

## SAŽETAK

Zbog spremnika specifičnog oblika i relativno slabe iskorištenosti teretnog prostora, brodovi za prijevoz ukapljenog plina često imaju jednostruku oplatu. Kao takvi, osjetljivi su na sudar u odnosu na suvremene brodove sa dvostrukom oplatom. Porastom pomorskog prometa rastu rizici sudara, a to je u slučaju prijevoza opasnih tereta u zatvorenim morima veoma opasno. Čvrstoću i otpornost broda na sudar, a uz nevelike dodatne potrebe za prostorom, moguće je povećati primjenom suvremenih sandwich riješenja. Najčešće, riječ je o dva lima između kojih se nalaze metalni profili raznovrsnih oblika.

Cilj rada je upoznati se s navedenim brodovima, kao i sa kompleksnošću samog sudara. Postojeći model teretnog prostora, sastavljen od konačnih elemenata, potrebno je modificirati u dijelu oplate tako da umjesto klasične sadrži sandwich strukturu. Pri tome je potrebno paziti da su dijelovi konstrukcije dobro povezani i da je sačuvana ravnoteža masa. Zatim je potrebno provesti numeričku simulaciju sudara uz određena pojednostavljenja.

## SUMMARY

Due to the specific form of the tank and the relatively low utilization of cargo space, ships for transporting liquefied natural gas often have a single hull. As such, they are susceptible to crash compared to modern ships with double hulls. Increase in maritime traffic collision risks are increasing, and it is in the case of transport of dangerous goods in enclosed seas very dangerous. Strength and resistance to crash the ship, and with not great additional space requirements can be increased by applying modern compound solutions. Most often, it is a two sheet between which there are various forms of metal profiles. The aim was to get acquainted with these ships, as well as the complexity of the collision. With the existing container ship model, composed of finite elements, it is necessary to modify the part of the shell so that instead of the classic sandwich structure contains. It is necessary to ensure that parts of the structure are well connected and that the mass balance is preserved. Then it is necessary to implement a numerical simulation collision with some simplifications.

# 1. UVOD

U uvjetima teške ekonomske krize u kojoj se trenutno nalazi svjetsko gospodarstvo raste potreba za raznovrsnim oblicima energije. Među njima su i tekući plinovi koji predstavljaju čist oblik energije i mogu osigurati dosadašnji nivo industrijske proizvodnje i potrošnje energije. Ukapljeni prirodni plin (Liquefied Natural Gas, LPG) i ukapljeni naftni plin (Liquefied Petroleum Gas, LPG) mogu značajno smanjiti zagađenje koje uzrokuje upotreba drugih fosilnih goriva poput sirove nafte i ugljena. Zbog potrebe smanjenja negativnog utjecaja na okolinu, sve je veća potrošnja prirodnog plina. Velika zemljopisna udaljenost između područja proizvodnje i potrošnje plina oduvijek je predstavljala veliki problem ove industrije, stoga se nastojalo smisliti kako prevesti što veću količinu ukapljenog plina. Osim sigurnosti, trebalo je gledati tehnički i ekonomski spektar problema.

Transport ukapljenog plina cijevovodima predstavlja prevelik trošak, a ponegdje je zbog zemljopisnih i političkih uvjeta to neizvediv cilj. Prijevoz plina morem, iako prepoznat kao ekonomski najpovoljniji nije pratio potražnju za prirodnim plinom. Zbog vrlo zahtjevnih karakteristika skladištenja i prijevoza (vrlo niska temperatura i zapaljivost ) tehnologija dostupna sredinom prošlog stoljeća nažalost nije pružala veće mogućnosti za razvoj transporta morem. Postupnim razvojem tehnologije i različitih metoda numeričke analize koje će se u ovom radu koristiti postignut je napredak u konstruiranju brodova za siguran transport plina.

Tema ovog rada je razmotriti poboljšanje čvrstoće i otpornosti broda prilikom sudara dodavanjem suvremenih riješenja kao što su sandwich konstrukcije. Ovaj problem će se analizirati metodom konačnih elemenata, numeričkom metodom koja pruža kvalitetan i dovoljno točan prikaz odziva konstrukcije modela brodova u sudaru. Nakon modeliranja sandwich konstrukcije fine mreže konačnih elemenata na boku broda koja se lako može izraditi u programskom paketu FEMAP, cijeli brod će se prebaciti u softver LS-Dyna u kojem će se zatim izvršiti analiza sudara kako bi se odredio odziv konstrukcije koja trpi naprezanja i deformacije koje se javljaju prilikom bočnog sudara dvaju brodova.

# 2. BRODOVI ZA PRIJEVOZ UKAPLJENOG PLINA

## 2.1. LNG I LPG plinovi i proces ukapljivanja

LNG je kratica za prirodni ukapljeni plin ( Liquified Natural Gas ). LNG je smjesa plinova koja se pri okolišnom tlaku i temperaturi nalazi u plinovitom stanju. U smjesi dominira metan, a uz njega nalaze se još i etan, propan i butan. Prirodni plin se u pogonima za ukapljivanje prvo pročišćava od različitih primjesa (propana, etana, butana, pentana, dušika, vode ), a potom u procesu hlađenja na -161˚C pretvara u bezbojmu tekućinu bez mirisa. Pare LNG-a su bez mirisa i boje. Ukoliko i dođe do ispuštanja LNG-a, zbog njegove niske temperature doći će do kondenzacije vodene pare u zraku i formiranja bijelog oblaka, koji je odmah uočljiv. LNG sam po sebi ne gori jer ne sadrži kisik. Nije eksplozivan na otvorenom, nije otrovan, kancerogen niti kemijski reaktivan. [13]

Procesom hlađenja smanjuje mu se obujam za oko 600 puta, zbog čega ga je u posebno dizajniranim tankerima moguće prevoziti do prihvatnih LNG terminala na udaljenim, inače nedostupnim odredištima, slika 1. Jedan LNG tanker ekvivalent je 600 tankera koji prevoze prirodni plin pri atmosferskom tlaku, zbog čega prijevoz putem tankera, višestruko jeftiniji i jednostavniji, predstavlja stvarnu alternativu transportu plinovodima.

Postrojenja za ukapljivanje najčešće su smještena uz obalu i u blizini luka s većom dubinom mora zbog prihvata brodova sve veće zapremine koji odvoze ukapljeni prirodni plin. Osim toga mogu biti izgrađena i kao plutajući objekti usidreni u blizini kopnenih ili priobalnih polja prirodnog plina. Usprkos složenosti, postrojenja za ukapljivanje su zapravo veliki hladnjaci, a hladenje je bit procesa ukapljivanja. Budući je hlađenje povezano s velikom potrošnjom energije, postojeća komercijalna postrojenja za ukapljivanje prirodnog plina nastoje svesti na minimum razliku u temperaturi između prirodnog plina koji se podvrgava hlađenju i rashladnog sredstva pomoću kojeg se plin hladi. To se postiže odabirom rashladnog sredstva i primjenom više ciklusa hlađenja. Na svim modernim postrojenjima za ukapljivanje, prirodni plin se ukapljuje kroz dva ili tri ciklusa hlađenja. Stalnim razvojem tehnologije nastoji se postići što veća učinkovitost procesa ukapljivanja, smanjiti štetnu emisiju plinova i nadasve povećati kapacitet terminala.[13]



**Slika 1. Terminal za LNG plin** [12]

Danas se najćešće primjenjuju sljedeći procesi ukapljivanja :

• proces s miješanim rashladnim sredstvom uz pothlađivanje propanom (*Propane Preecold Mixed Refrigerant Process - C3 MR*), slika 2.

• modificirani procesi s miješanim rashladnim sredstvom uz pothlađivanje propanom - *C3MR/Split i AP-X proces*

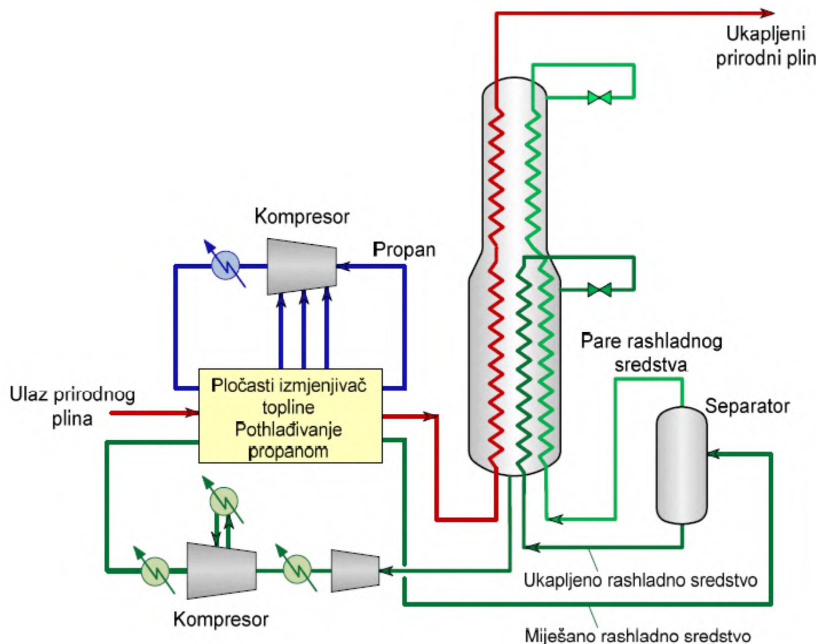
• optimizirani kaskadni proces

• kaskadni proces s miješanim fluidima (*Mixed Fluid Cascade Process - MFC*)

• proces s dva miješana rashladna sredstva (*Dual Mixed Refrigerant Process - DMR*)

• liquefin proces

• PRICO proces




**Slika 2. Proces s miješanim rashladnim sredstvom uz pothlađivanje propanom-C3MR proces** [7]

LPG je kratica za ukapljeni naftni plin (Liquified Petrol Gas). LPG je mješavina ukapljenih ugljikovodika nastalih preradom nafte koji su u normalnom stanju plinovi, a pri povećanju tlaka prelaze u tekuće stanje. Ukapljeni naftni plin se sastoji većinom od propana $C_3H_8$ ili butana $C_4H_{10}$, a najčešće u omjeru propan ( 35% ) / butan (65%). Pogodan je energent jer se dobiva ili u rafinerijskim postupcima prerade nafte ( atmosferska destilacija ) ili obradom sirovog prirodnog plina iz ležišta. [13]

Pri normalnim uvjetima LPG je plinovit i teži od zraka, a ukapljuje se pri prilično niskim tlakovima, od 1.7 do 7.5 bar. Tlak ukapljivanja izravno ovisi o smjesi ( čisti butan se ukapljuje već pri 2.2 bar, a propan pri 22 bar). Ukapljeni naftni plin nema boje ni mirisa, stoga mu se dodaju posbni dodaci kako bi se mogao otkriti u slučaju njegovog istjecanja

Općenito govoreći LPG ima slijedeće prednosti:

- visoki stupanj iskorištenja - kod nekih postrojenja i do 95%
- mogućnost kombinacije s ostalim gorivima;
- lako održavanje i sigurno rukovanje plinskim uređajima;
- nema pripremnih faza za korištene energije.

## 2.2. Povijest prijevoza ukapljenog plina

Prvi prijevoz ukapljenog plina morem obavljen je 1959. godine iz Sjedinjenih Američkih Država ka Velikoj Britaniji teretnim brodom posebno za prijevoz plina nazvanim *Methane Pioneer* nastao preradom američkog teretnog broda *Normati,* slika 3. Imao je skladišni prostor od tadašnjih velikih 5000 $m^3$ i teretni prostor mu se sastojao od pet aluminijskih samonosivih prizmatičnih spremnika toplinski izolirani drvenim pločama.



**Slika 3.** ***Methane Pioneer*** [8]

Prvi komercionalni brodovi za prijevoz ukapljenog plina bili su *Methane Princess i Methane Progress.* Oba su bila u vlasništvu tvrtke Conch International Methane i svaki je imao po devet prizmatskih spremnika, ukupnog obujma 27400 m3. Prevozili su ukapljeni plin za tvrtku British Gas od Alžira do otoka Canvey na rijeci Temzi. *Methane Princess* je obavio više od petsto plovidbi i povučen je iz upotrebe tek 1998. godine dok je *Methane Progress* plovio 467 puta, a u zasluženu mirovinu otišao je 1992. godine. Nakon 1970. godine došlo je do postupnog razvoja tehnologije u izradi brodova za prijevoz ukapljenog plina i vodi se velika briga o sigurnosti o čemu najbolje govori podatak da nije zabilježena nijedna nesreća tih brodova. Na slici 4. prikazan je suvremeni tanker za prijevoz LNG plina. [14]




**Slika 4. LNG tanker** [14]

## 2.3. Konstrukcija broda za prijevoz ukapljenog plina

Cjelokupna konstrukcija brodova za prijevoz ukapljenih plinova, pa tako i onih za prijevoz ukapljenog prirodnog plina propisana je pravilima Međunarodne Pomorske Organizacije (International Maritime Organization) i odnosi se na sve brodove bez obzira na njihovu veličinu. Za razliku od drugih vrsta brodova i tereta koji prevoze, tankeri za prijevoz ukapljenih plinova se razlikuju po načinu konstrukcije i rukovanja teretom za vrijeme putovanja. Postoje različite vrste brodskih tankova od kojih su najpoznatiji Kvaerner Moss neovisni tankovi te Gaz Transport & Technigaz membranski tankovi. Ono što povezuje sve koncepte konstrukcije brodskih tankova je da se ukapljeni prirodni plin u tekućem agregatnom stanju prevozi pri temperaturama od oko -160°C te da je tlak u tankovima malo iznad atmosferskog tlaka.

Glavni dijelovi tankova za prijevoz ukapljenog prirodnog plina su:

- primarna barijera koja je u direktnom dodiru sa tekućim plinom
- sekundarna barijera (na membranskim brodovima)
- temperaturna izolacija
- međuprostor (u nekim sustavima ispunjen dušikom)
- potporne strukture koje podupire navedene elemente.

Spremnici za ukapljeni plin moraju biti toplinski izolirani kako bi se, u što većoj mjeri, spriječilo zagrijavanje ukapljenog prirodnog plina, odnosno hlađenje trupa broda što povećava krtost čelika i može uzrokovati puknuće unutarnje strukture broda. Također, spremnici moraju biti plinotijesni kako bi se spriječilo miješanje plina sa zrakom, kao i gubitak ukapljenog plina te moraju biti dovoljno velike čvrstoće kako bi podnijeli hidrostatski tlak ukapljenog plina i mali pretlak koji se javlja unutar spremnika te kako bi podnijeli eventualne sudare sa drugim brodovima. Pravilnik o konstrukciji broda dijeli brodske spremnike koji se koriste pri prijevozu tereta ukapljenog prirodnog plina na neovisne i membranske spremnike. Neovisni spremnici su u potpunosti samo-potporni i ne čine dio brodskog trupa. Također ova vrsta spremnika ne pridonosi čvrstoći trupa broda. Po pravilniku Međunarodne pomorske organizacije nezavisni spremnici podijeljeni su u tri različita tipa: A, B i C . Na brodovima za prijevoz ukapljenog prirodnog plina najčešće koristi se tip B neovisnog spremnika. Ova vrsta može biti izrađena od ravnih ili sferičnih ploha. Količina ukapljenog prirodnog plina ukrcana u neovisni spremnik B tipa djeluje svim svojim opterećenjima na samo-potporni spremnik i njegovu potpornu strukturu. Zbog sferičnog oblika sva opterećenja koja se prenose na strukturu spremnika se ravnomjernije raspoređuju, a zbog toga i imaju slabiji utjecaj na samu konstrukciju. Neovisni spremnik B tipa je zbog svoje konfiguracije i simetričnosti konstrukcije priznat od strane Međunarodne Pomorske organizacije kao spremnik sa najvećom razinom sigurnosti jer su analize i proračuni pokazali da i ako dođe do pukotine na njegovoj strukturi, takva pukotina će se vrlo sporo širiti i curenje tekućeg ukapljenog plina će biti svedeno na minimum. [11]

# 3. SUDARI

Promet morem oduvijek je predstavljao najjeftiniji oblik prijevoza. U zadnje vrijeme sve veća koncentracija brodova na velikim trgovačkim rutama povećava rizik od nesreća na moru i eventualnih ekoloških katastrofa. To je osobito opasno ukoliko se dogodi u našem, zatvorenom Jadranskom moru. Kako bi se poboljšala sigurnost plovidbe i izbjegli mogući gubici ljudskih života, šteta na imovini, a i onečišćenja mora, potrebno je uspostaviti odgovarajući sustav za usmjeravanje plovidbe i njezin nadzor. Najčešće se koristi sustav grupiranja brodova u pojedinim smjerovima kretanja. Kako se nesreće nažalost ipak događaju, slika 5. pred konstruktorima brodovima je veoma težak posao. Potrebno je očvrsnuti strukturu broda, posebno dijela gdje su spremnici, kako ne bi prilikom sudara došlo do puknuća spremnika i ekološke katastrofe. U zadnje vrijeme razmatra se dvostruka sandwich oplata koja povećava sigurnost zaustavljajući prodor udarajućeg broda. To je izrazito zanimljiv pristup konstruiranju oplate broda, te će stoga sandwich konstrukcija biti tema mog završnog rada koja će biti obrađena u slijedećim poglavljima.



**Slika 5. Bočni sudar brodova**

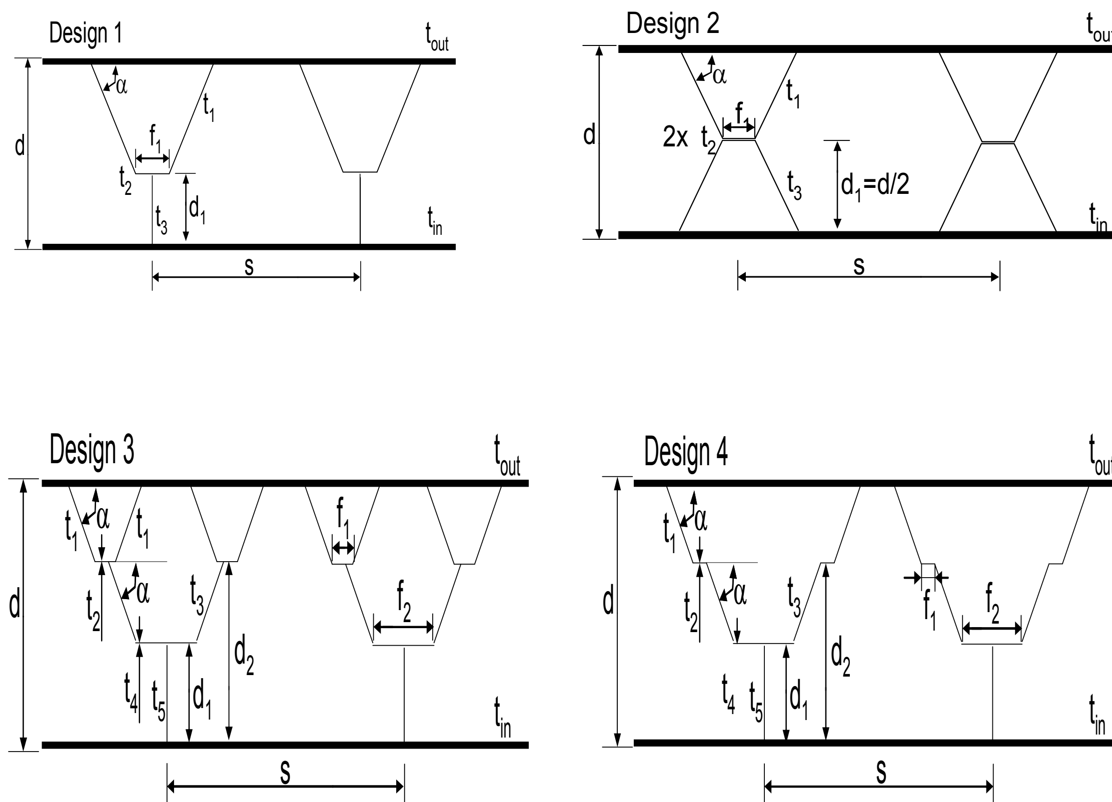
### 3.1. Vanjska dinamika i unutarnja mehanika sudara

Sudari brodova su skoro u potpunosti neelastični što znači da je kinetička energija prilikom sudara pretvorena u potencijalnu energiju. Ta energija uzrokuje deformacije u strukturi barem jednog od dvaju sudarenih brodova. Postupak analize sudara sastoji se od dva dijela: vanjske dinamike i unutarnje mehanike. Analiza vanjske dinamike proučava gibanje brodova i utjecaj okolne vode na njih. Cilj vanjske dinamike je procjena utjecaja kinetičke energije na puknuće i plastične deformacije broda. Za vanjsku dinamiku, razvijene su analitičke metode za izračun kinetičke energije i sudarnih impulsa u sudarima različitih tipova : sudar brod-brod, sudar brod sa plutajućim predmetom. Cilj unutarnje mehanike je analiza odziva koji se pojave uslijed sudara i deformacije na boku udarenog broda i pramcu udarajućeg broda.

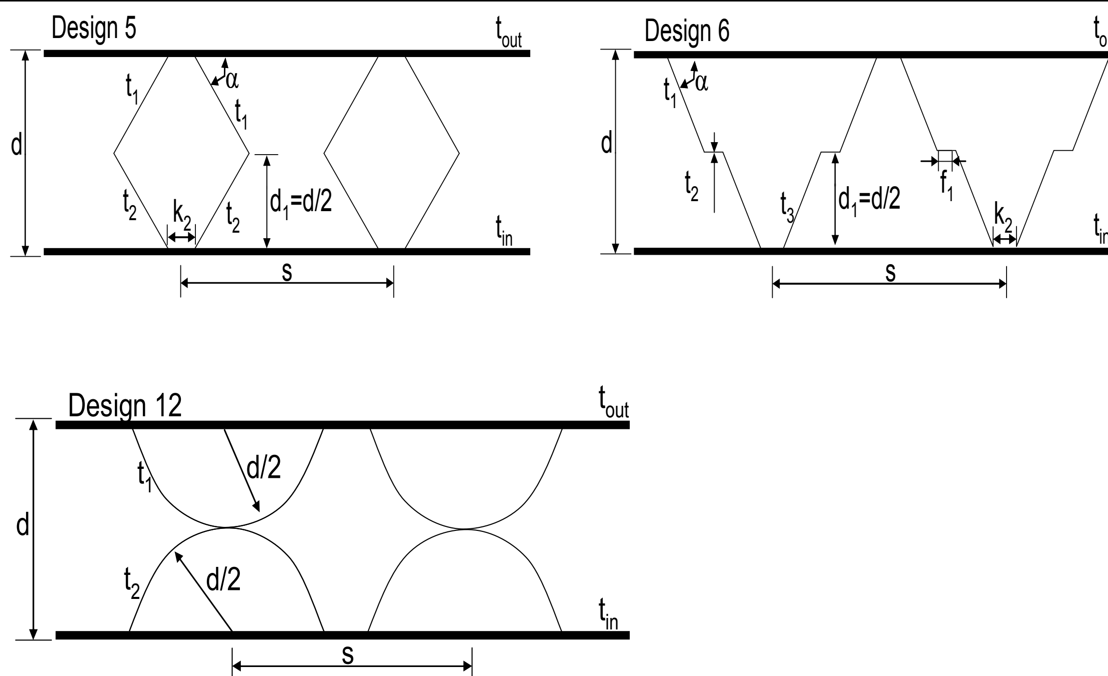
### 3.2. Sandwich konstrukcija

Sandwich konstrukcije (sandwich materijali) imaju široku primjenu; u graditeljstvu (krovovi, podovi, pregradne stijene i sl.), zrakoplovstvu (oplate krila, trupa, repa, unutarnje uređenje zrakoplova i sl.), pri gradnji vozila (automobili, kamioni, željeznička vozila) i drugim područjima. Između ostalog vrlo je značajna primjena u brodogradnji, posebno maloj brodogradnji, za brze brodove kao i u nekim posebnim slučajevima, primjerice za izradu brodova za prijevoz opasnih tereta. Posebno mjesto zauzimaju sendvič konstrukcije na osnovi polimernih materijala. Osnovna prednost takvih konstrukcija je u njihovoj visokoj mehaničkoj krutosti, otpornosti umoru, žilavosti, kemijskoj postojanosti itd. Njihova primjena dovodi do smanjenja mase konstrukcije, te posljedično povećanja nosivosti. Također razvojem tehnologije zavarivanja, pogotovo laserskog, razvile su se i čelične sandwich konstrukcije pogodne za izradu oplata velikih brodova. Takve konstrukcije potencijalno pružaju bolja mehanička svojstva i veću sigurnost prilikom sudara. Sandwich konstrukcije se najviše upotrebljuju u strukturnim dijelovima broda, na stranicama i dnu broda. Ti dijelovi broda su u uporabi izrazito mehanički opterećeni, te pri izboru materijala i pri dimenzioniranju prioritetno udovoljava zahtjevima koji su povezani s mehaničkim opterećenjem. Primjenom sandwich konstrukcije gubi se potreba za podupiranjem čime se dobija na fleksibilnosti unutrašnjosti prostora. [5]

Sandwich konstrukcija se obično sastoji od unutarnje i vanjske ploče koje razdvaja čelična jezgra kao što se vidi na slici 6. Ploče su laserski zavarene za jezgru. Jezgra jako utječe na cijelokupno ponašanje strukture prilikom sudara. Također, ona određuje i cijenu proizvodnje takvih konstrukcija. Postoje različiti uzorci sandwich konstrukcija, a među njima najpoznatije su konstrukcije sa X i Y čeličnom jezgrom. Ispitivanja sudara sa sandwich konstrukcijama na stvarnim brodovima su veoma skupa, stoga se prije samog konstruiranja nastoji napraviti numerička analiza različitih sandwich uzoraka kako bi se na kraju dobila optimalna konstrukcija koja bi imala mješavinu najboljih mehaničkih svojstava s obzirom na dane zahtjeve te dakako i sigurnosne uvjete.



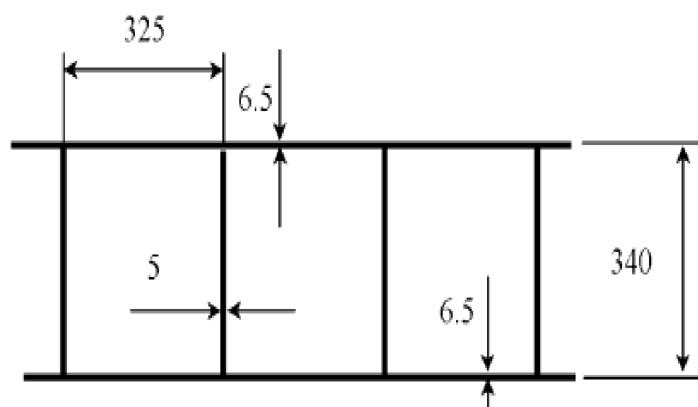

**Slika 6. Vrste sandwich konstrukcije** [3]

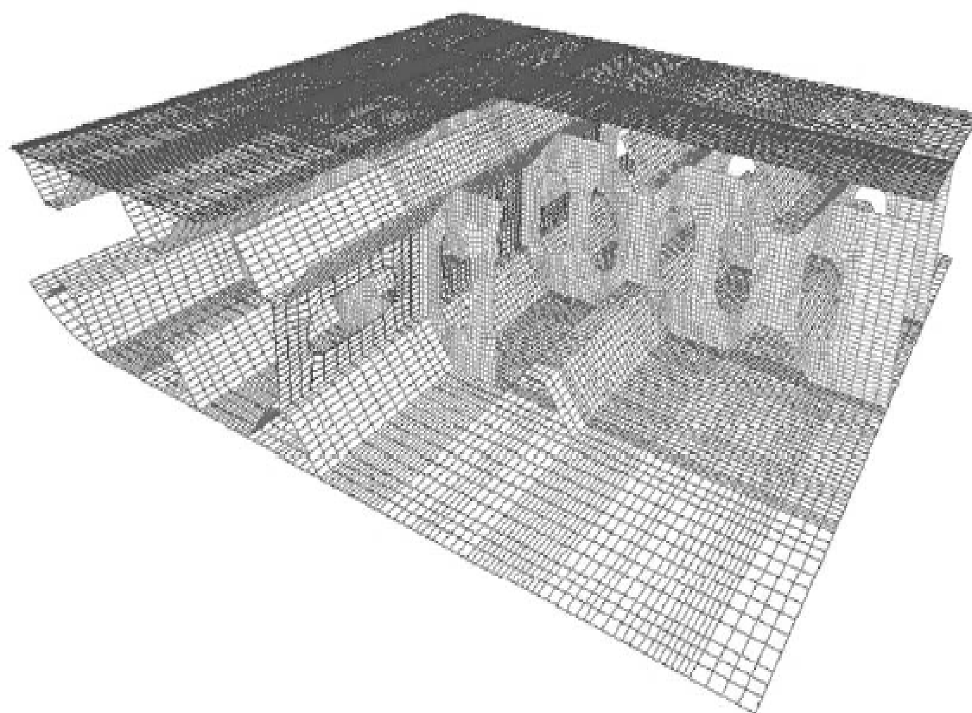



**Slika 7. Vrste sandwich konstrukcije** [3]

Vanjski slojevi sandwich konstrukcije mogu biti, a često i jesu, načinjeni od materijala veće čvrstoće i krutosti. Površinski slojevi nose opterećenje u smjeru ravnine, a također i poprečna naprezanja uslijed savijanja. Konstrukcijski gledano, jezgra ima dvije funkcije. Prvo, ona razdvaja površinske slojeve te se suprotstavlja deformiranju u smjeru okomitom na ravninu. Drugo, ona u određenoj mjeri osigurava krutost u ravninama okomitima na površinski sloj.

Iako sandwich konstrukcije veoma dobro podnose globalno distribuirana opterećenja i imaju veliku čvrstoću i krutost, problemi nastaju kada su prisutna lokalna opterećenja. Sandwich ploče su slabe na lokalna opterećenja zbog male debljine ploča i zato ne prenose opterećenja na nosače. Problem se riješava povećanjem debljine ili primjenom jače vrste sandwich konstrukcije. [5]



**Slika 8. Prikaz dna broda s sandwich konstrukcijom** [10]

# 4. METODA KONAČNIH ELEMENATA

## 4.1. Uvod

Metoda konačnih elemenata je numerička metoda nezaobilazna u inženjerskim proračunima. Postoje mnogi računalni programi temeljeni na toj metodi koji omogućuju analizu konstrukcija bez razmatranja složene teorije koja opisuje fizikalno ponašanje konstrukcije. Metoda konačnih elemenata je prvenstveno približna numerička metoda, te stoga treba biti jasno da su dobivena riješenja približna, a mogu se približiti realnim vrijednostima jedino pravilnim izborom proračunskog modela i pravilnim odabirom konačnih elemenata koji su u mogućnosti opisati realni proces deformiranja. Razvoj metode konačnih elemenata počeo je 50-tih godina prošlog stoljeća. U početnoj fazi on se odvijao kroz dva međusobno nezavisna pristupa; prvo inženjerski, a odmah zatim i matematički. Složene prostorne konstrukcije u inženjerskim proračunima zamijenjivane su diskretnim sustavima koji su se sastojali od štapova i koji su računati po poznatim postupcima statike linijskih nosača. Sa matematičke strane, tražena su približna riješenja određenih graničnih zadataka pomoću diskretnih modela uz primjenu varijabilnih postupaka. Kasnije su oba pristupa objedinjena što je jako doprinjelo ubrzanom razvoju metode konačnih elemenata.[1]

## 4.2. Osnove metode konačnih elemenata

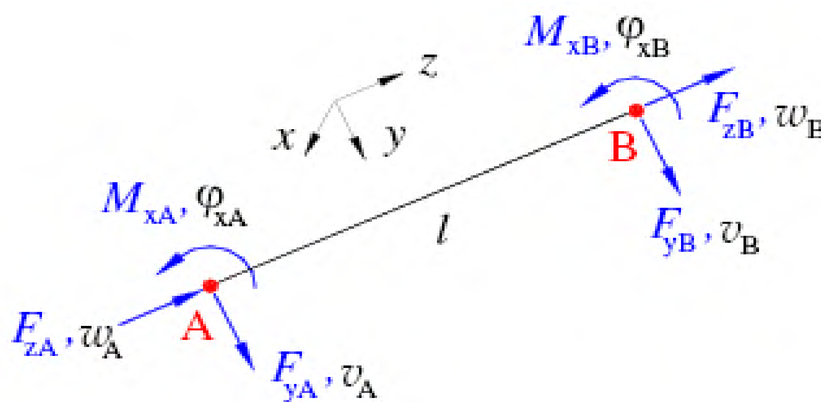
Metoda konačnih elemenata numerička je metoda koja se temelji na fizičkoj diskreditaciji kontinuuma. Razmatrani kontinuum s beskonačnim brojem stupnjeva slobode zamjenjuje se diskretnim modelom međusobno povezanih elemenata s ograničenim brojem stupnjeva slobode. Zapravo, područje kontinuuma se dijeli na konačan broj potpodručja koja se nazivaju konačni elementi, odnosno razmatrani kontinuum postaje mreža konačnih elemenata. Konačni elementi su međusobno povezani u točkama koje se zovu čvorovi. Stanje u svakom elementu, kao što je polje pomaka, deformacije, naprezanja opisuje se pomoću interpolacijskih funkcija. Te funkcije moraju zadovoljavati odgovarajuće uvjete kako bi se diskretizirani model što više približio ponašanju kontinuiranog sustava. Uz pravilnu formulaciju konačnih elemenata, približavanje točnom riješenju postiže se većim brojem konačnih elemenata. [1]

Diferencijalne jednadžbe imaju oblik interpolacijskih funkcija koje povezuju zavisne varijable s njihovim vrijednostima u čvorovima. Za svaki element se izvodi lokalni algebarskih jednadžbi čije su nepoznanice čvorne veličine. Nakon toga se odgovarajućim postupcima formira globalni sustav jednadžbi za cijeli diskretizirani model, u kojemu su nepoznanice čvorne vrijednosti svih elemenata diskretiziranog područja.

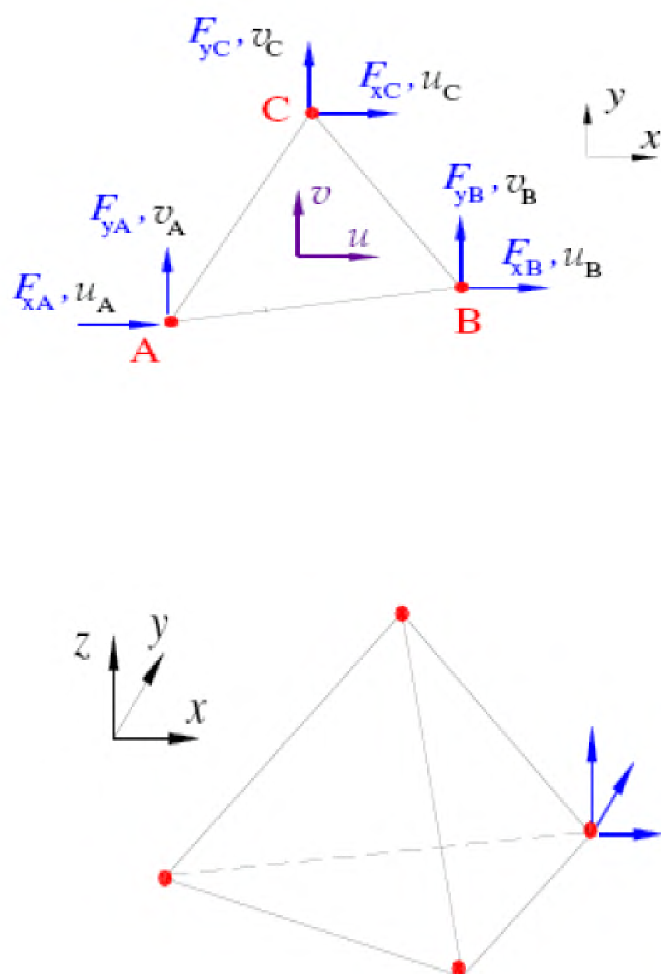
S obzirom na način formuliranja i izvođenja osnovnih jednadžbi MKE, odnosno jednadžbi za pojedine konačne elemente postoje četiri osnovna aspekta MKE i to:

- direktna metoda
- varijabilna metoda
- metoda rezidiuma
- metoda ravnoteže energija

Konačni elementi mogu biti linijski, plošni i volumni, prikazano na slikama 9. i 10.




**Slika 9. Linijski konačni element**




**Slika 10. Plošni i volumni konačni element**

Osnovna matrična jednadžba nekog sustava glasi :

$$[\mathbf{K}] \bullet [\boldsymbol{\delta}] = [\mathbf{F}]$$

gdje je :

K- matrica krutosti

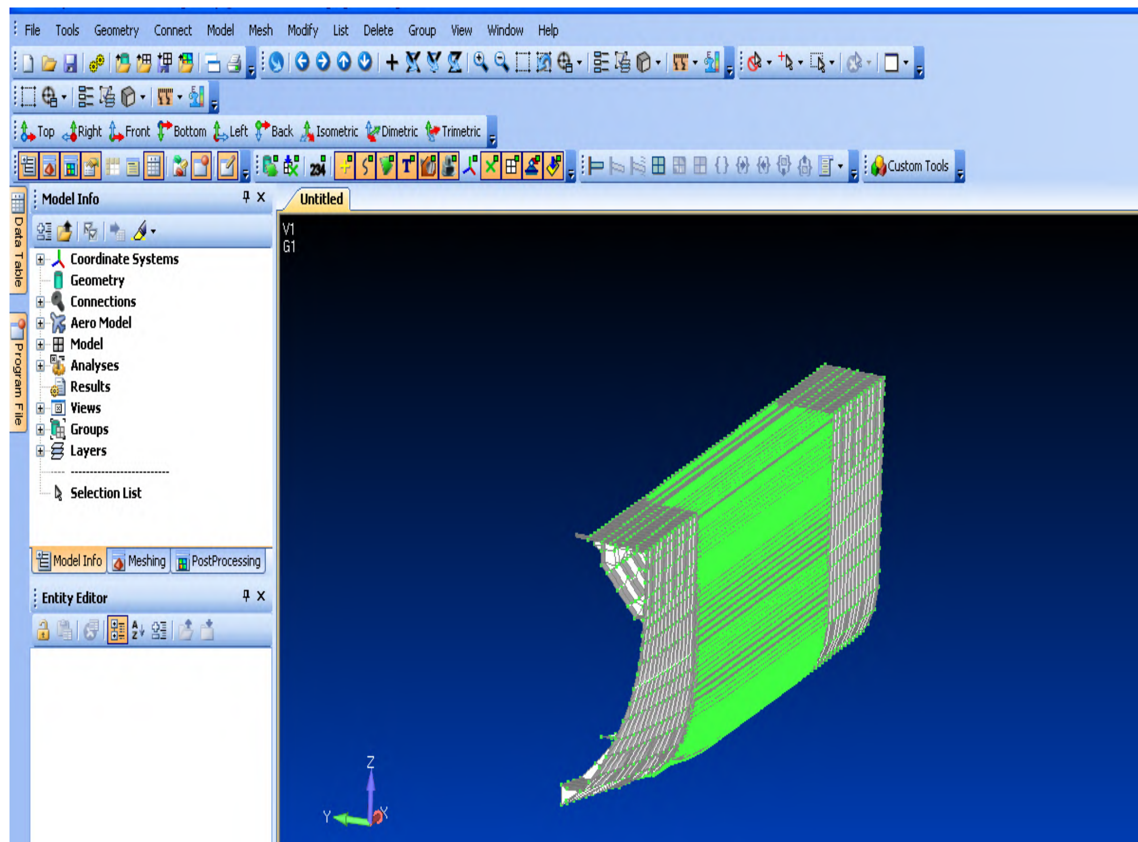
δ- vektor nepoznatih čvornih pomaka

F - vektor poznatih sila u čvorovima

### 4.3. Računalni programski paket FEMAP/ NX NASTRAN

Kako se razvijala metoda konačnih elemenata tako su se i postupno razvili računalni programi za strukturnu analizu konstrukcija tom metodom. U ovom završnom radu modeliranje je rađeno u programskom paketu FEMAP/NASTRAN, a analiza sudara brodova je provedena u LS-DYNA-i.

FEMAP (Finite Element Modeling And Postprocessing) i njegov rješavač (solver ) NX NASTRAN zajedno čine inženjerski program za analizu složenih konstrukcija metodom konačnih elemenata i potpuni prikaz modela i rezultata analize. U programu se mogu modelirati komponente, sklopovi i sustavi i lako se može predvidjeti i poboljšati učinkovitost proizvoda. FEMAP ima ugrađene translatore za preuzimanje geometrije iz svih glavnih CAD programa, kao Solid Edge, NX, Pro/E, Catia, Solid Works, Inventor, AutoCAD. Na raspolaganju su svi potrebni programski alati za kreiranje krivulja, površina i solid modela. Priprema geometrije za različite vrste analiza je zato brza i jednostavna. Na slici 11. prikazano je sučelje FEMAPA.

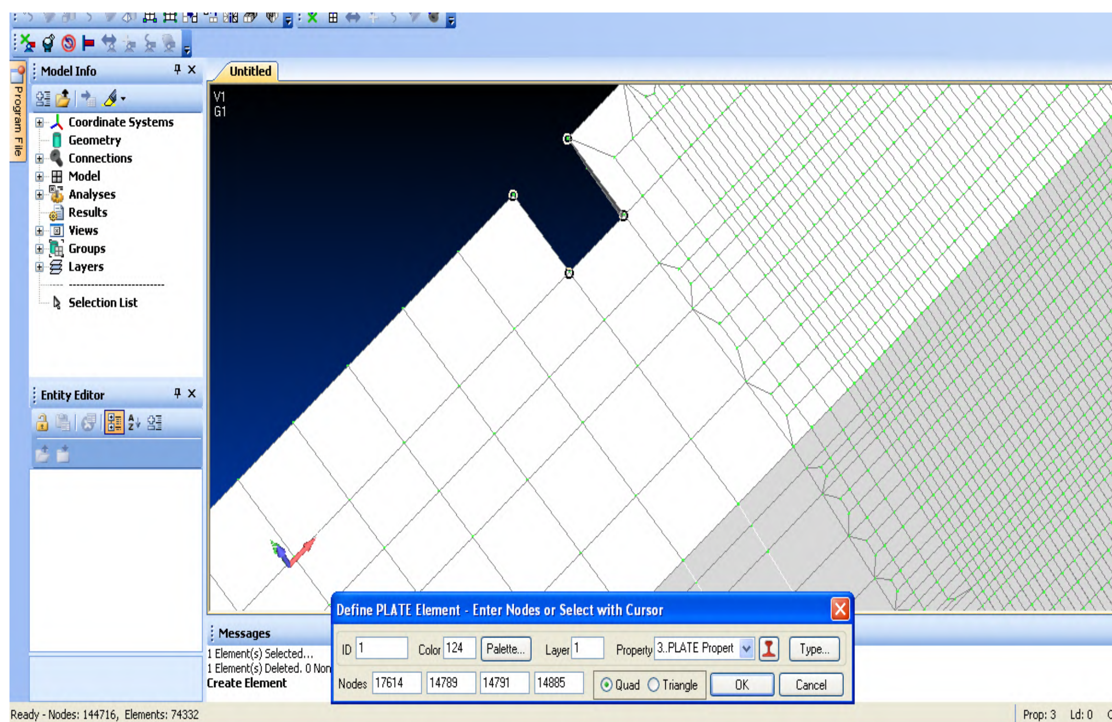



**Slika11. Prikaz sučelja programskog paketa FEMAP s modelom dijela broda**

Kao svaki drugi 3D softver za analizu metodom konačnih elemenata, prilagođen je potrebama korisnika koji se lako snalazi u preglednom sučelju FEMAP-a.

Dokaz praktičnosti sučelja FEMAP-a očituje se kroz brzo i jednostavno kreiranje potrebne geometrije. Na primjeru kreiranja pločastog elementa zadanih svojstava objasnit će se postupak stvaranja geometrije, slika 12. U alatnoj traci nalazi se kartica *Model* koja kad se otvori izbacuje padajući izbornik sa funkcijama.

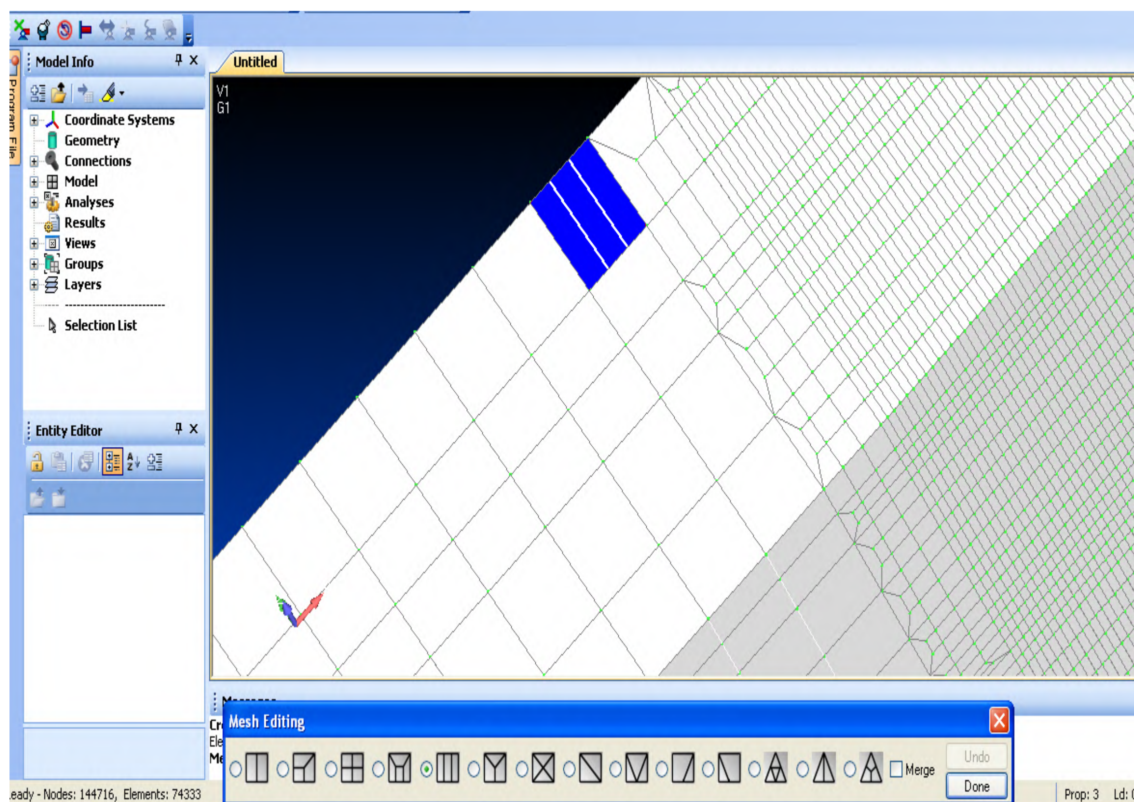
Kliknuvši na funkciju *Element* otvara se sljedeći izbornik koji daje mogućnost stvaranja elemenata pomoću 4 čvora ( plate element ). Također se u tom izborniku mogu mijenjati svojstva ( property ) koja su prethodno zadana. Zatim odabirom željenih čvorova i potvrđivanjem Ok kreira se pločasti ( plate ) element.




**Slika 12.Stvaranje pločastih (plate) elemenata**

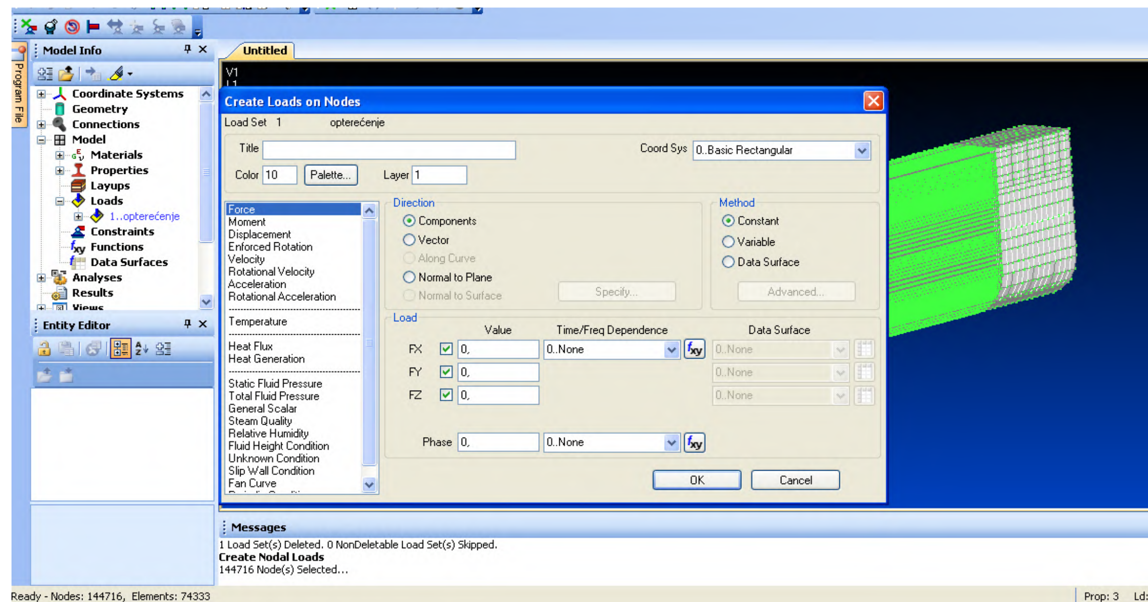
Na veoma jednostavan način može se doraditi mreža konačnih elemenata, vidljivo na slici 13. Upotrebom već napravljenog pločastog elementa može se stvoriti finija mreža elemenata manjih veličina. U alatnoj traci, pod karticom *Mesh* otvara se padajući izbornik i odabirom na funkciju *Edit* otvaraju se neke podfunkcije.

Zatim se otvara izbornik sa različitim alatima za uređivanje trokutastih i četvrtastih pločastih elemenata.

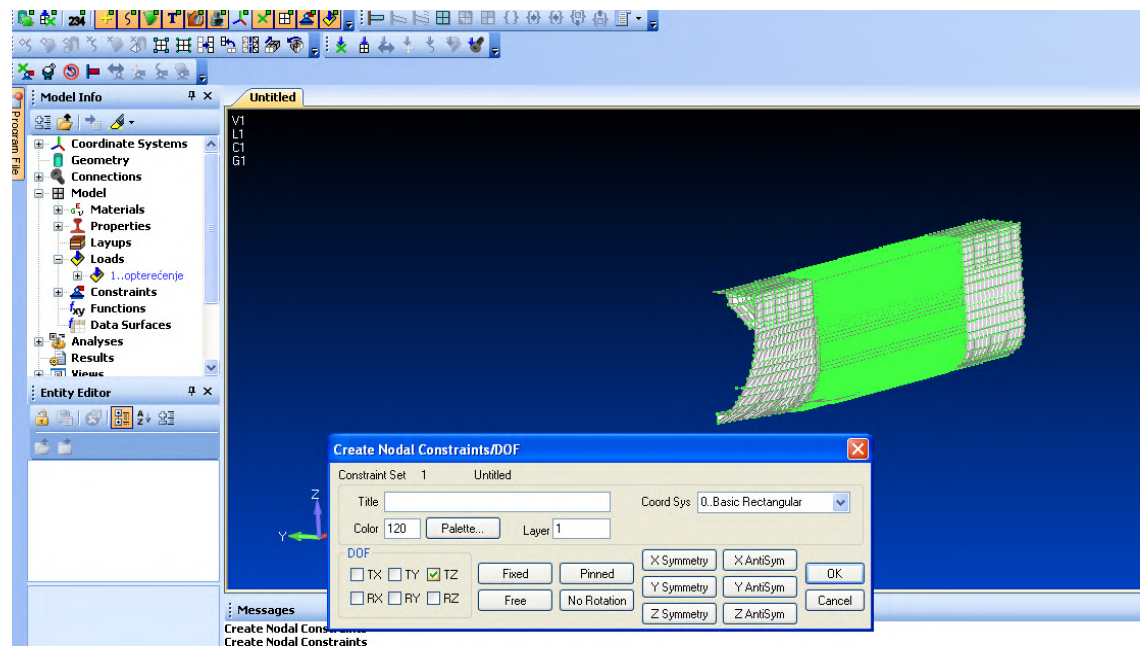



**Slika 13. Stvaranje fine mreže konačnih elemenata**

Nakon definiranja potrebne geometrije i kreiranje fine mreže elemenata zadaju se opterećenja i rubni uvjeti. To se može vršiti preko čvorova ili preko elemenata. U alatnoj traci, pod karticom *Model* otvara se padajući izbornik sa različitim podfunkcijama. Odabirom *Load* može se zadati opterećenje čvora ili pak cijelog elementa. Na slici 14. prikazano je zadavanje opterećenja preko čvorova gdje se nakon odabira željenih čvorova koja će biti opterećena može zadati smjer i iznos različitih opterećenja ( sila, moment, gravitacija, itd. ). U istoj kartici *Model* podfunkcijom *Constraint* na gotovo isti način se zadaju rubni uvjeti. Slika 15. prikazuje zadavanje rubnih uvjeta na čvorovima. Mogu se zadati različiti rubni uvjeti, primjerice uklještenje jednog kraja modela ili samo fiksiranje oko jedne osi.




**Slika 14. Zadavanje opterećenja**




**Slika 15. Zadavanje rubnih uvjeta**

## 4.4 . Računalni programski paket LS-DYNA

LS-Dyna je programski paket za nelinearnu analizu metodom konačnih elemenata.
Razlikujemo:

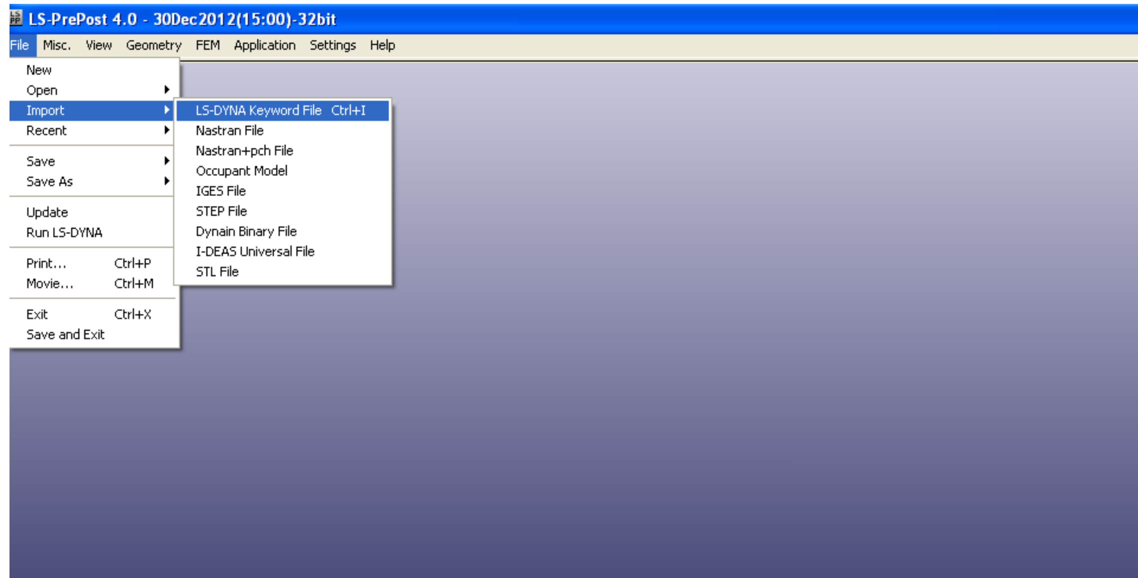
1. LS-Dyna manager - softver kojim se pokreće analiza (rješavač) i upravlja nekim postavkama rješavača, kao što su izbor broja procesora, verzija rješavača, rad s licencnom datotekom .
2. LS-Prepost - softver pomoću kojega se izrađuju modeli i analiziraju rezultati proračuna.

LS-Dyna čita ulaznu tekstualnu datoteku koja se sastoji od ključnih riječi i pripadajućih parametara. Cijeli model kao i njegovi parametri jednostavno su i razumljivo opisani u toj datoteci. Naknadno moguće je dodati komentare i uređivati je kao i svaku drugu tekstualnu datoteku. Moguće je „ručno“ upisati sve potrebne podatke u ulaznu datoteku: definirati čvorove, elemente, parametre analize itd. I zatim pokrenuti proračun upućivanjem rješavača na tu datoteku.

U praksi, mreža konačnih elemenata generira se u prikladnom softveru, LS-Prepostu ili FEMAP-u i zapisuje u zasebnu datoteku. Ta datoteka sadrži veliki broj čvorova i elemenata koji su sada izdvojeni, a datoteka se može nazvati npr. mesh.txt ili uobičajenije za LS-Dyna-u: mesh.k. U tom slučaju „ručno“ se generira samo manja i pregledna ulazna datoteka koja sadrži najvažnije parametre krutosti, analize i slično naziva npr. analiza-model1.k. Na taj način ulazna datotka je pregledna i u njoj se lako prate i mijenjaju potrebni parametri. Velika datoteka, najčešće nepromijenjiva, s mrežom konačnih elemenata poziva se zatim odgovarajućom naredbom iz same ulazne datoteke.

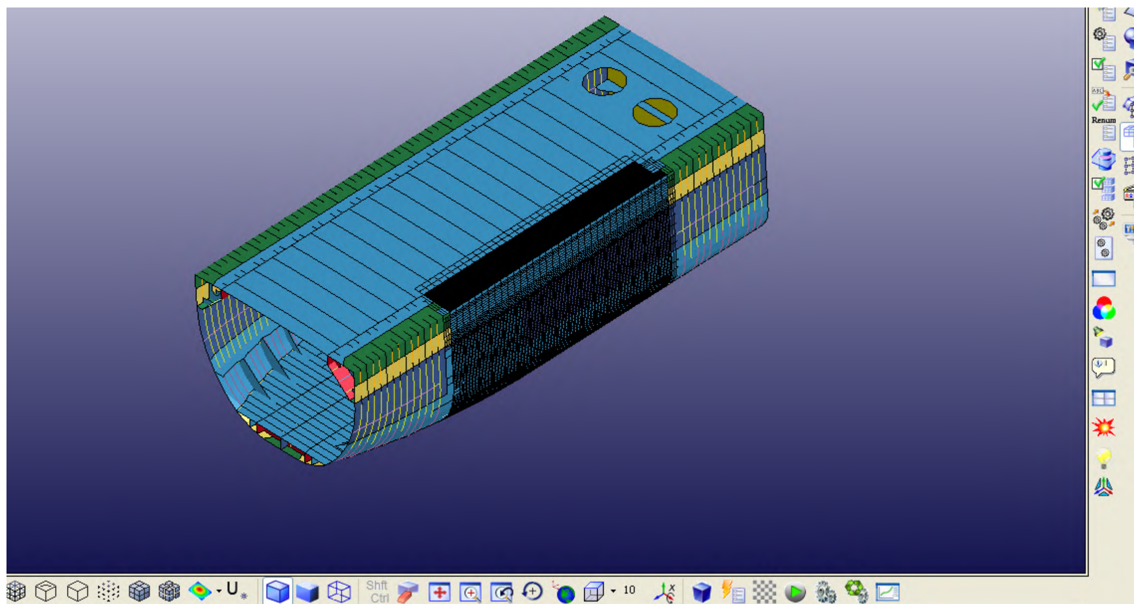
Kada je proračun gotov, nastaje datoteka *.d3plot, kao prva (ili jedina) od d3plot datoteka s rezultatima. Za proračune u vremenskoj domeni, broj d3plot datoteka ovisit će o trajanju proračuna i učestalosti zapisa rezultata, a što određuje korisnik. D3plot datoteka otvara se u LS-Prepostu i zatim se mogu gledati rezultati.

Kao što je vidljivo na slici 16. već izrađeni model otvara se u LS-Prepostu naredbom *Import / LS-Dyna Keyword File.*



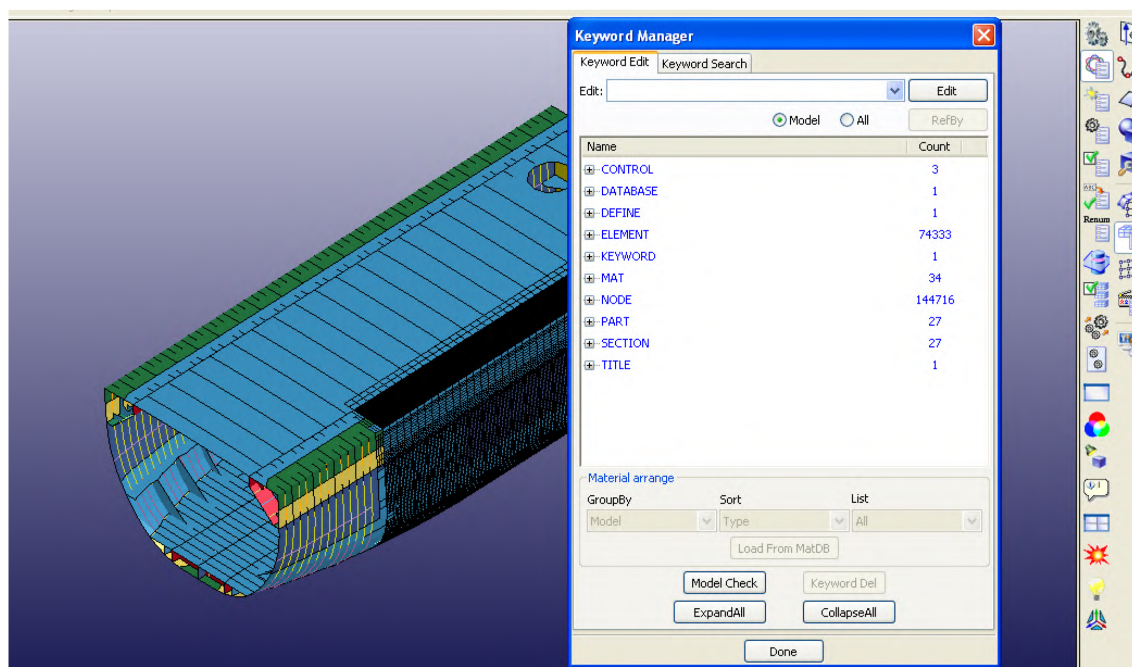

**Slika 16. Prikaz sučelja LS-Preposta**

Kada se otvori željeni model, moguće ga je uređivati kao i u ostalim programima za analizu metodom konačnih elemenata, slika 17.



**Slika 17. Dorađeni model broda za prijevoz ukapljenog plina**

LS-Dyna sadrži ključne riječi koje se mogu upisivati direktno ili u tekstualnoj datoteci npr. core.k ili se to može napraviti u programu LS-Prepost, slika 18. Pri tome je od velike pomoći korisnički priručnik bez kojeg se ne može koristiti softver.




**Slika 18. Prikaz ključnih riječi**

Najosnovnije ključne riječi su :

- INCLUDE ( osigurava sredstva čitanja nezavisnih ulaznih datoteka koje sadrže podatke određenog modela. Sadržaj datoteke je smješten direktno na lokaciji *INCLUDE linije)
- CONTROL ( koristi se za promijenu zadanih parametara i aktiviranja pojedinih opcija kao što su podešavanje mase, prilagodba mreže elemenata… )
- DATABASE ( potrebno za dobivanje izlaznih datoteka sa rezultatima analize)
- ELEMENT ( označava konačne elemente )

Npr.

```
*ELEMENT_SHELL
$#  eid   pid    n1    n2    n3    n4    n5    n6    n7    n8
1, 1, 1, 2, 271, 270
2, 1, 2, 3, 272, 271
3, 1, 3, 4, 273, 272
4, 1, 4, 5, 274, 273
```

- NODE ( označava čvorove )

Npr.

```
*NODE
$#   nid            x             y             z     tc     rc
1, 0.00400381, 0.120266, 0
2, 0.00501273, 0.120266, 0
3, 0.00602164, 0.120266, 0
4, 0.00703056, 0.120266, 0
5, 0.00803947, 0.120266, 0
6, 0.00904839, 0.120266, 0
7, 0.0100573, 0.120266, 0
```

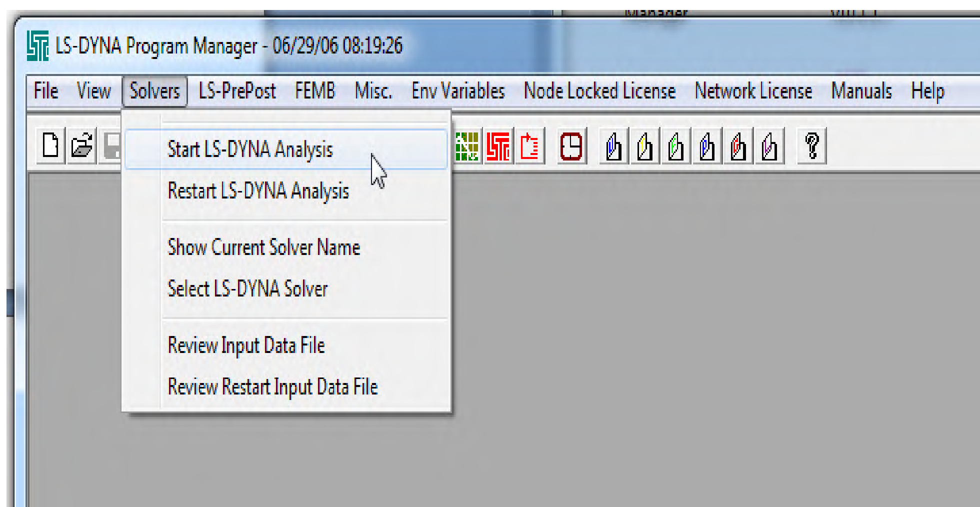
- PART ( definira svojstvo krutosti koje se pridružuju elementima, Uz svaki element uvijek je navedeno koje mu svojstvo krutosti pripada, odnosno koji je njegov Part ID (ili PID).

Npr.

```
*PART
$# title

$#    pid    secid     mid    eosid     hgid     grav   adpopt     tmid
        1        1      124
```

Poslije dorade ulaznih datoteka pokreće se analiza u LS-Dyna Manager-u što prikazuje slika19.




**Slika 19. Pokretanje analize u LS Manageru**

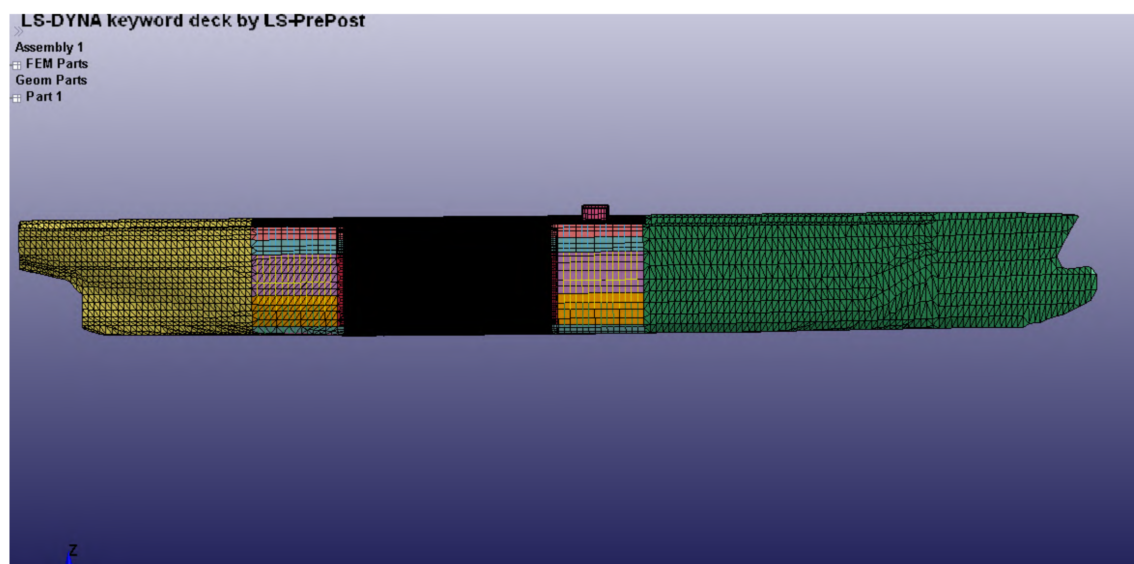
# 5. MODELI ZA ANALIZU SUDARA

## 5.1. Postojeći model udarenog broda

Udareni brod je LNG tanker spremnika tipa C, slika 20. Cjelokupni model modeliran je grednim i pločastim elementima definiranim sa tri ili četiri čvora. Spremnici imaju sedlaste oslonce na mjestima na kojima su spojeni sa strukturom broda. Spremnici su za brodsku konstrukciju bili spojeni oprugama, no u svrhu proračuna su opruge zamijenjene grednim elementima uslijed pretpostavke da bi opruge mogle ometati dinamičku analizu sudara. Gredni elementi kružnog su presjeka, dimenzionirani obzirom na krutost koju su posjedovale opruge. Tablica 1. prikazuje osnovne podatke broda. [6]

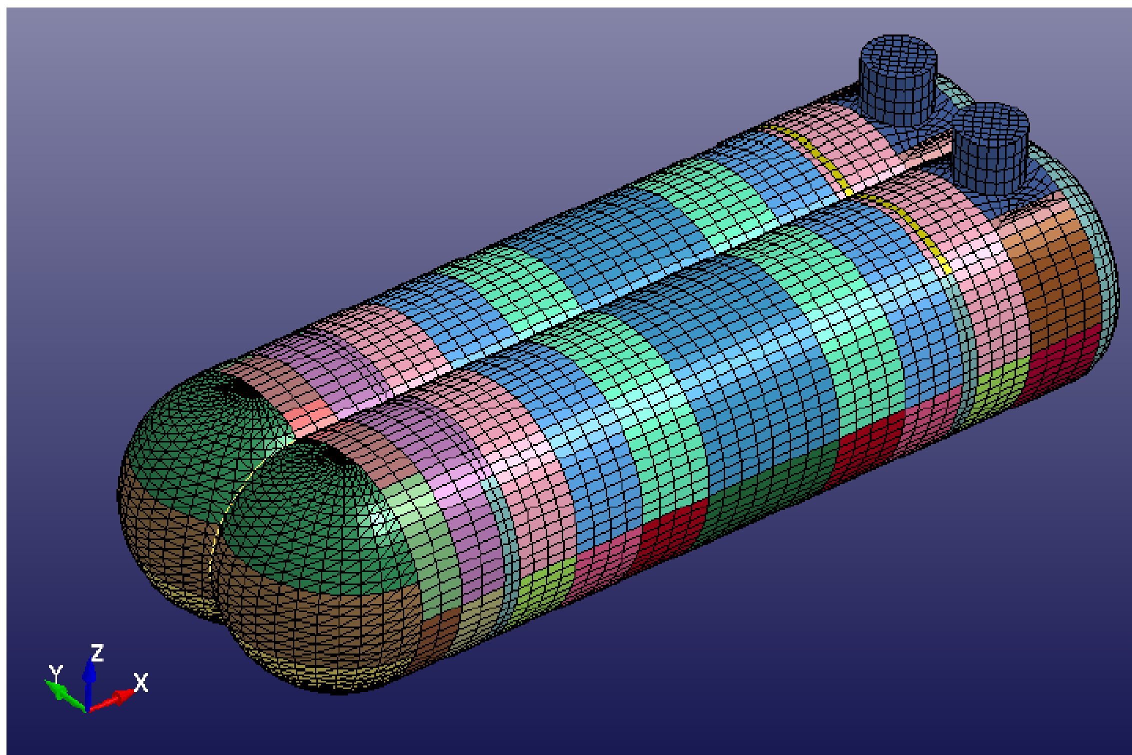
**Tablica1. Podaci udarenog broda**

| | |
|---|---|
| Masa praznog broda | 3607 tona |
| Masa tereta | 2148.6 tona |
| Istisnina (pri 1.025 t/m3) | 5755.6 tona |
| Gaz na krmi | 4.85 m |
| Gaz na pramcu | 4.59 m |
| Srednji gaz | 4.71 m |
| Položaj težišta broda po visini | 4.31 m |
| Položaj težišta broda po dužini | 63.74 m |

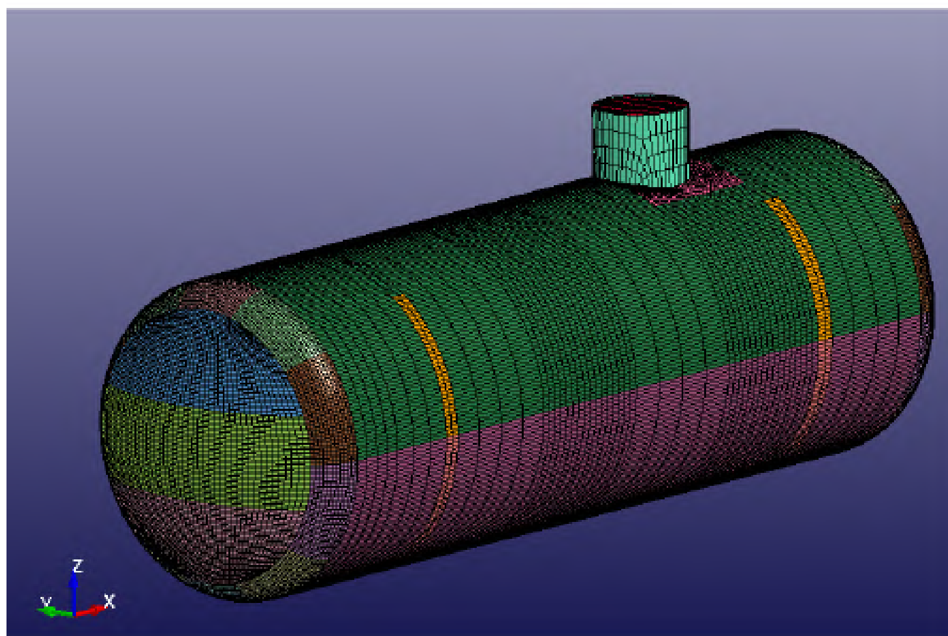



**Slika 20. LNG tanker**

Spremnici LNG tankera prikazani su na slikama 21. i 22.

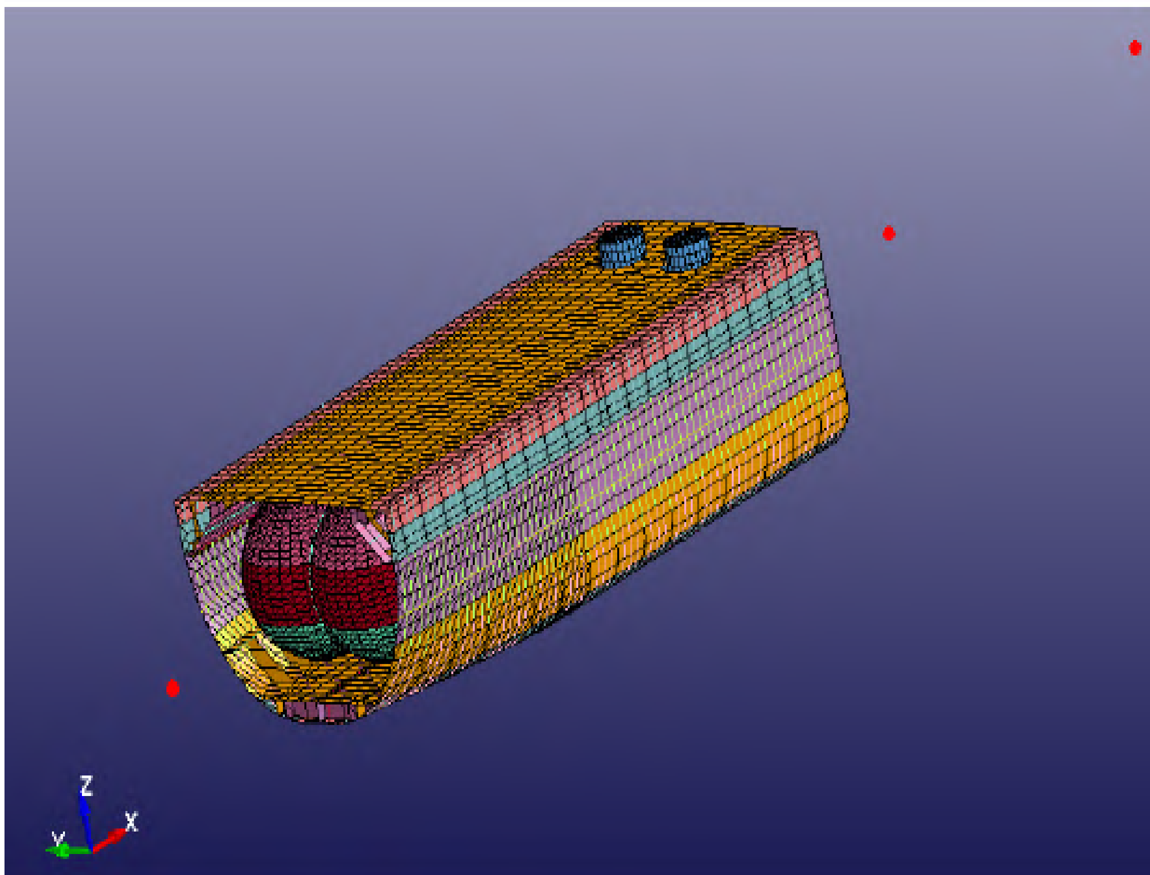



**Slika 21. Dvodijelni spremnik LNG tankera** [6]




**Slika 22. Cilindrični spremnik LNG tankera** [6]

Obzirom da čitav brod ima 136500 konačnih elemenata što značajno povećava vrijeme trajanja proračuna, model je prilagođen izdvajanjem srednjeg dijela, u kojem je smješten dvodijelni spremnik, a na kojem je predviđen sudar. Ostatak mase broda modeliran je masenim elementima ( *ELEMENT_MASS) u kojima je koncentrirana masa pramca (u dva čvora ) i krme (jedan čvor ). Time se znatno skratilo vrijeme trajanja proračuna i ostavilo vremena za modeliranje fine mreže konačnih elemenata. Slika 23. prikazuje izgled takvog modela gdje su crvenom bojom označene 3 točke koncentrirane mase. [6]

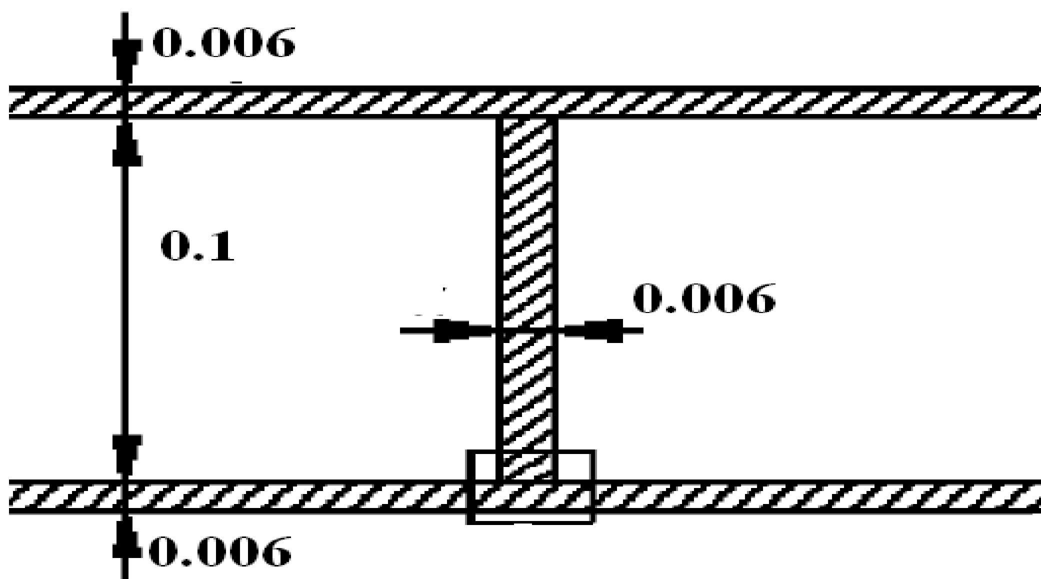



**Slika 23. Sredina broda sa dvodijelnim spremnikom te trima točkama koncentrirane mase** [6]

.

### 5.2. Izrada sandwich konstrukcije

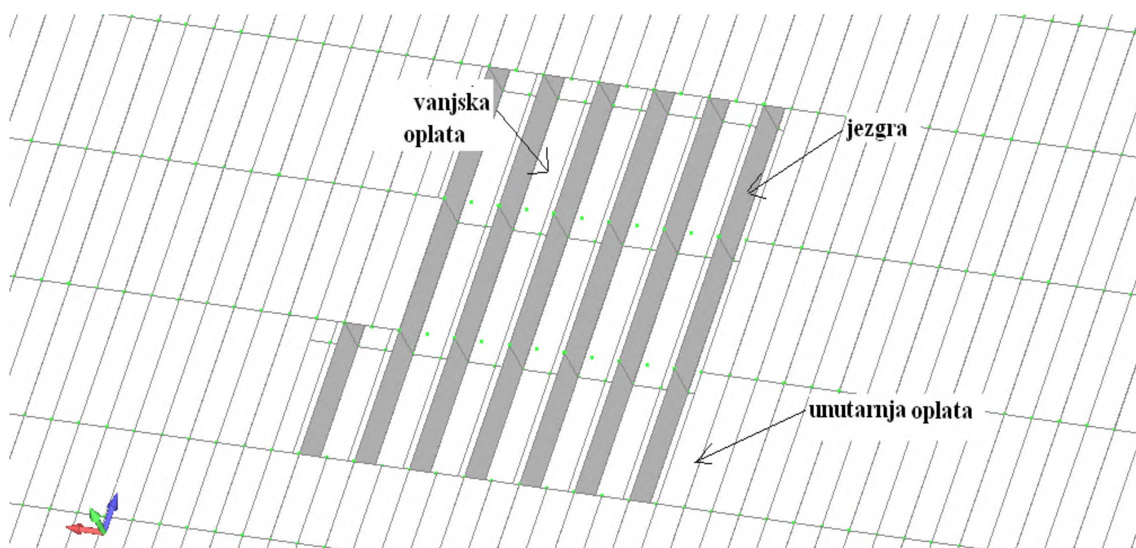
Koristeći dobivene modele, bilo je potrebno prilagoditi brod za analizu sudara. U dogovoru sa mentorom odlučeno je da će sandwich konstrukciju imati dio broda koji je neposredno izložen sudaru s udarajućim brodom. To je dio između dva sedlasta oslonca kojeg je bilo posebno važno poboljšati kako ne bi prilikom sudara došlo do prodiranja udarajućeg broda u spremnike s ukapljenim plinom. Prvi korak bio je odabir programskog paketa u kojem će se modelirati i za to je izabran program FEMAP, u kojem se na jednostavan i brz način može napraviti potrebna konstrukcija. Bok broda koji će biti dorađen prebačen je iz programa LS-Dyna u program FEMAP. Nakon toga bilo je potrebno analizirati navedeni dio broda i obrisati postojeće elemente na mjestu gdje dolazi sandwich konstrukcija.. Zatim je dogovoreno da će se sandwich konstrukcija sastojati od jednostavne jezgre (ploče), okomito zavarene na unutarnju i vanjsku ploču, slika 24. Na osnovi literature i riješenja iz prakse[2], dobio sam okvirne dimenzije ploča i jezgre te udaljenosti između njih.




**Slika 24. Presjek sandwich konstrukcije**

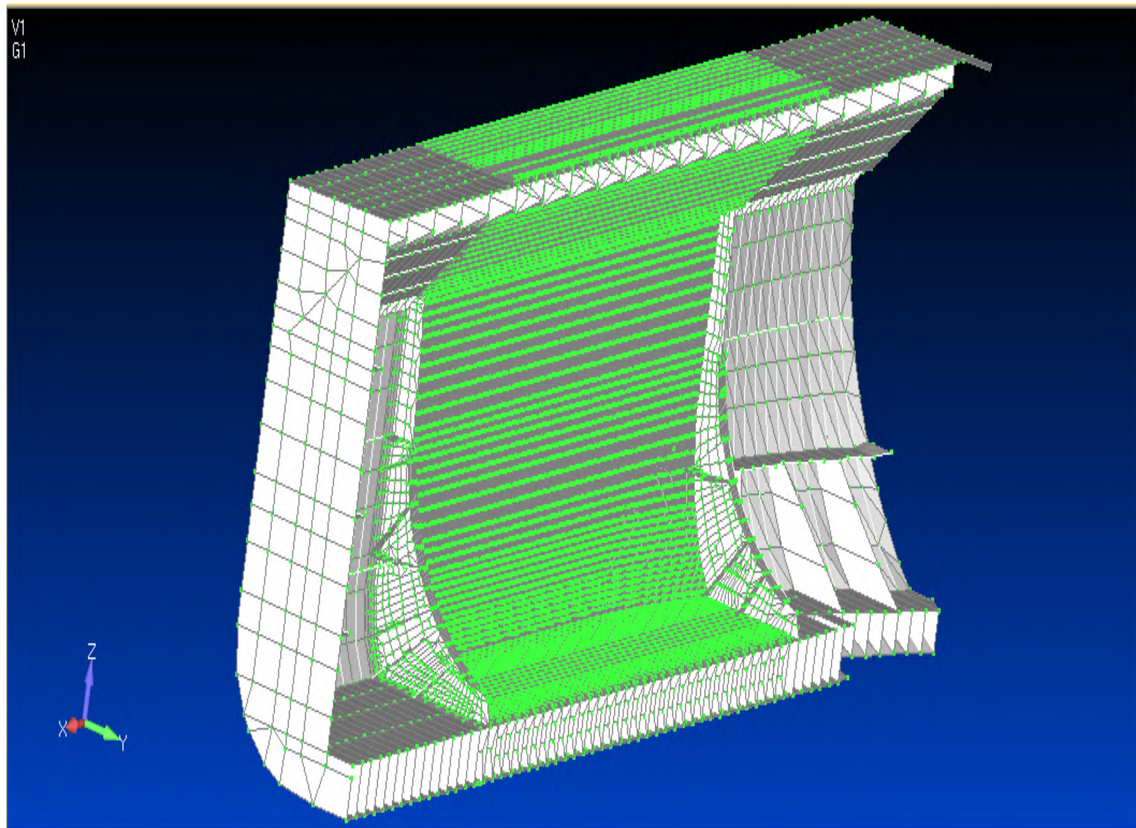
Unutarnja i vanjska oplata broda modelirana je finom mrežom pločastih konačnih elemenata veličine 0.07x0.165m. Ploče su debljine 0.006 m, kao i debljina jezgre koja je veličine 0.1x0.1m. Poprečne ploče jezgre, slika 25. razmaknute su za 0.145 m. Za sandwich konstrukciju kreirani su novi partovi sa sljedećim karakteristikama:

- Materijal: standarni konstrukcijski čelik ( $\rho = 7850$ kg/m$^3$, $E = 210000$ N / mm$^2$, Poissonov broj ν= 0,3)
- plate property
- debljina t= 0.006 m




**Slika 25. Modeliranje sandwich konstrukcije**

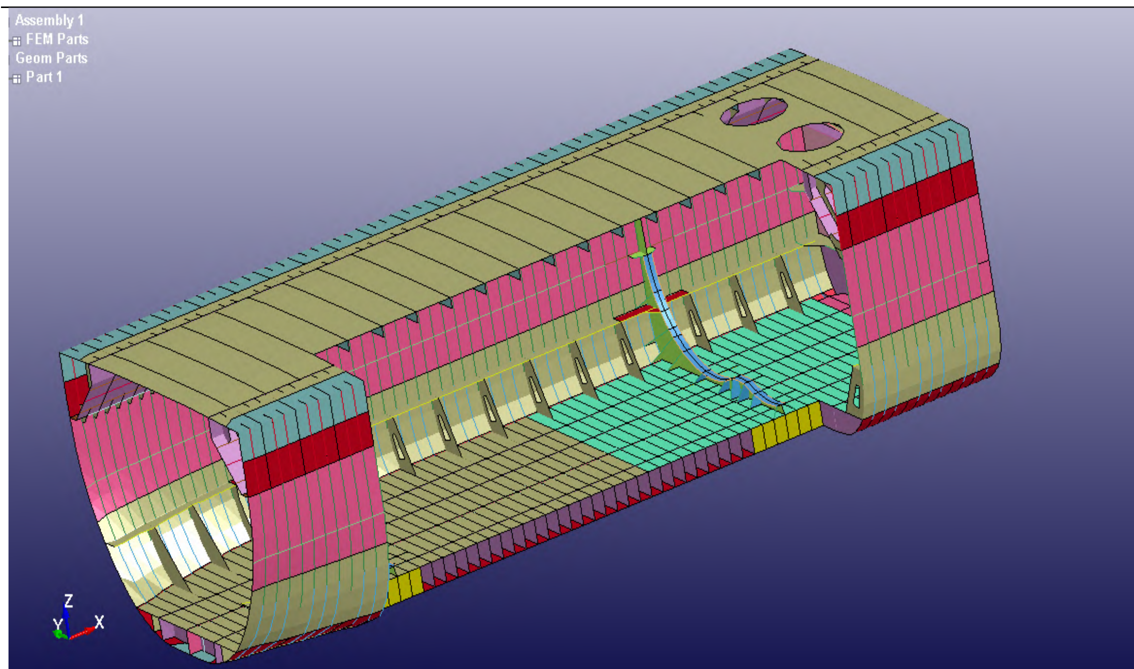
Osim izrade sandwich konstrukcije morala se izraditi finija mreža konačnih elemenata na dijelu broda koji je izložen sudaru, kreirajući elemente manjih dimenzija. Pri tome je bilo važno spojiti sve čvorove na prijelazu iz grublje u finiju mrežu kako proračun ne bi javljao eventualne greške. Nakon izrade sandwich konstrukcije i finije mreže izvršena je preliminarna analiza s jednostavnim opterećenjem kako bi se testirala kvaliteta elemenata i jesu li svi elementi pravilno spojeni. Na slici 26. prikazan je bok broda izložen sudaru na kojem je rađena finija mreža konačnih elemenata i sandwich konstrukcija.



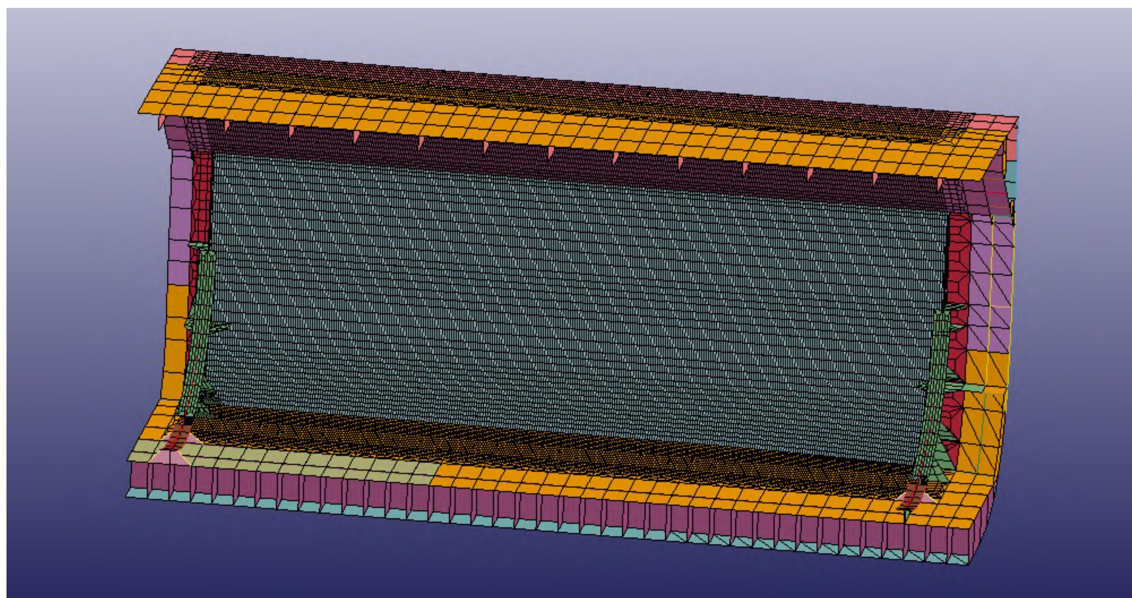

**Slika 26. Fina mreža konačnih elemenata**

## 5.3. Dorada postojećeg modela udarenog broda

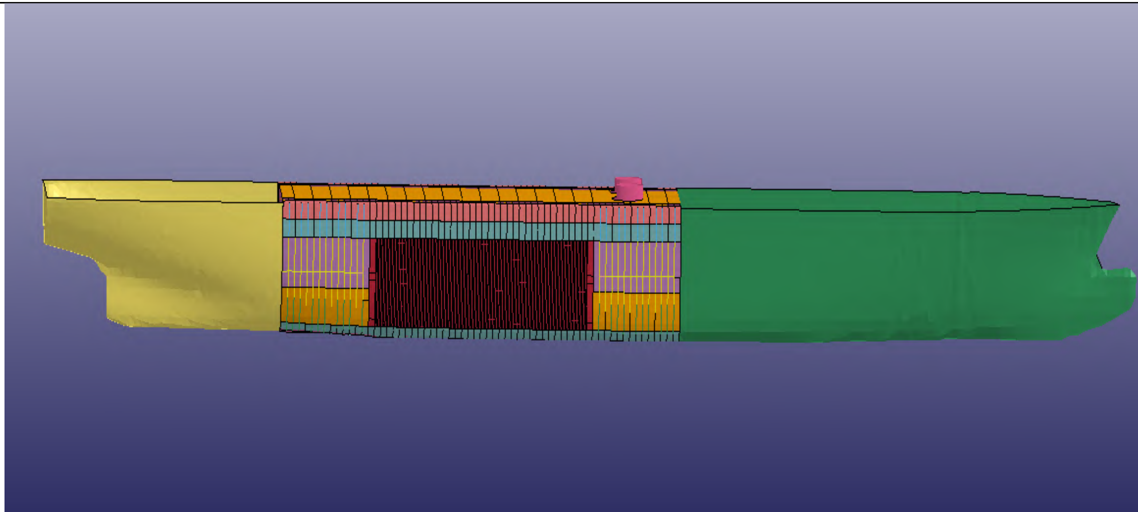
U postojećem modelu udarenog broda s jednostrukom oplatom prethodno opisanim u poglavlju 5.1. izrezan je srednji dio izložen sudaru, slika 27. To je točno dio koji će imati sandwich konstrukciju. Zatim se uzeo dorađeni bok broda sa sandwich konstrukcijom prethodno otvoren u LS- Prepostu, slika 28. i uklopio u udareni brod naredbom INCLUDE, slika 29. Taj će dorađeni brod kasnije biti analiziran u raznim slučajevima sudara sa udarajućim brodom.




**Slika 27. Srednji dio broda bez sandwich konstrukcije**



**Slika 28. Bok broda s sandwich konstrukcijom**

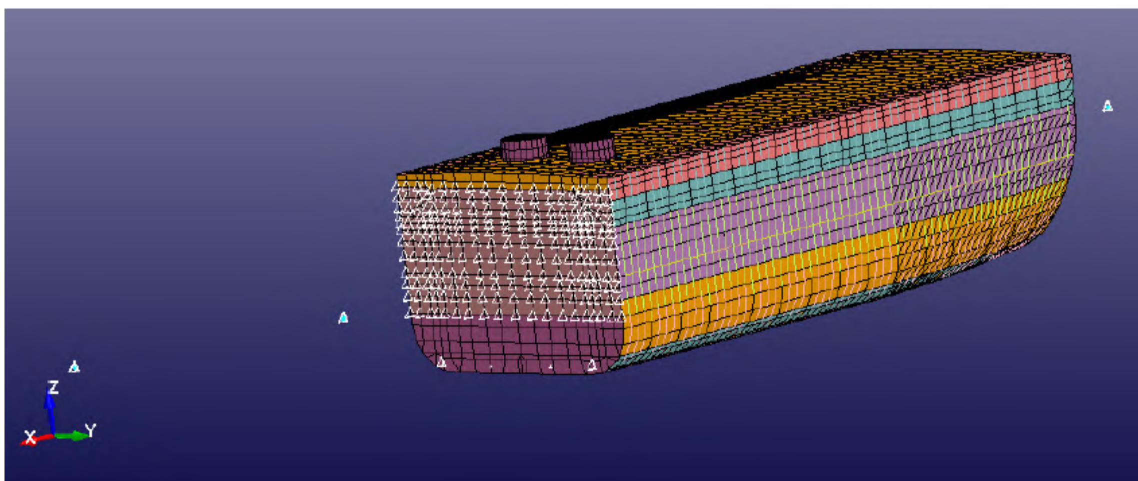


**Slika 29. Udareni brod sa sandwich konstrukcijom**

.

### *5.3.1. Rubni uvjeti i opterećenja*

U sklopu završnog rada radile su se analize sa različitim rubnim uvjetima i opterećenjima. Prilikom postavljanja rubnih uvjeta i opterećenja, najbitnije je stvoriti stvarnu situaciju. Za potrebe analize ovog slučaja sudara prvo se trebaju povezati točke koncentrirane mase sa udarenim brodom, slika 30. Prilikom povezivanja koncentriranih masa sa srednjim dijelom broda potrebno je jedan dio proglasiti potpuno krutim, odnosno neosjetljivim na naprezanja (RIGID– materijal beskonačne krutosti). Srednjem dijelu poprečne pregrade dodijeljena je takva karakteristika te su čvorovi preko posebno definiranog *PART-a povezani sa sredinom broda.



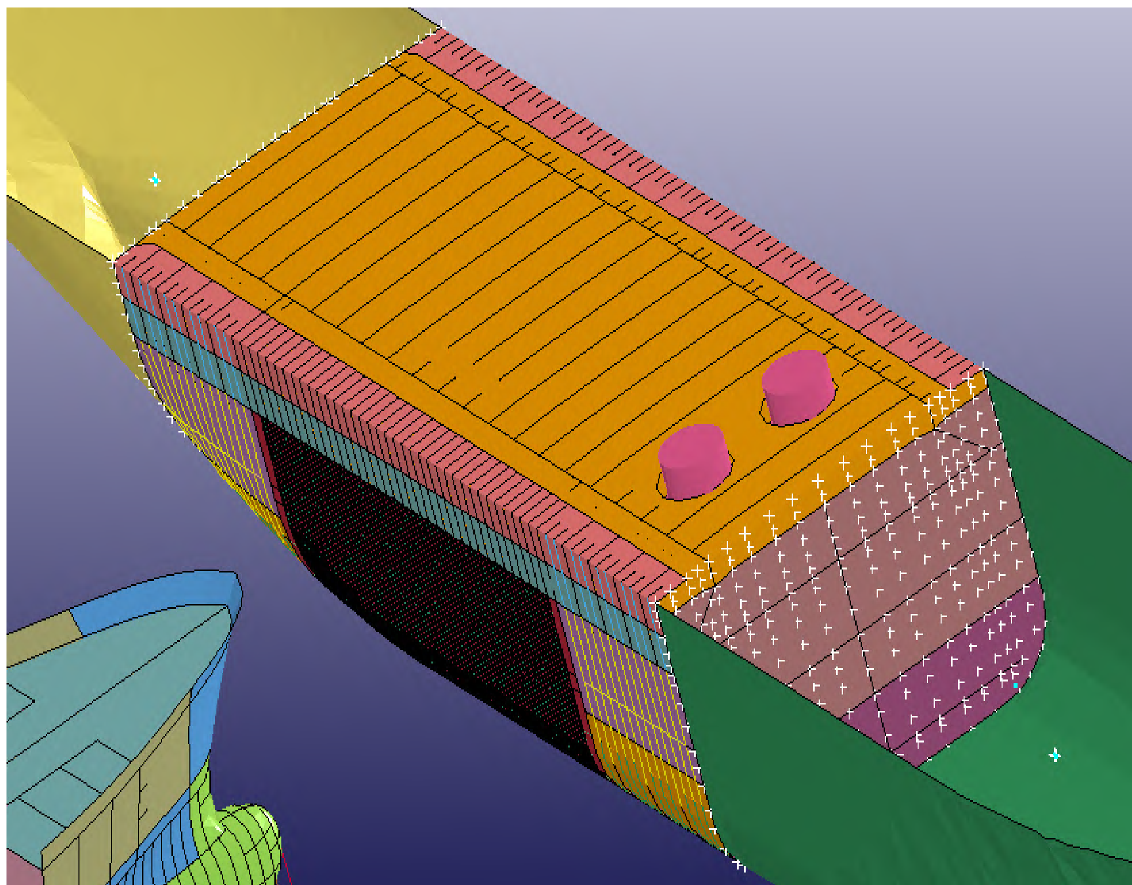

**Slika 30. Sredina broda s rubnim uvjetima pregrade i koncentriranih masa**

Za potrebe analize sudara, zadani su različiti rubni uvjeti udarenog broda prikazani u tablici 2.

**Tablica 2. Rubni uvjeti udarenog broda**

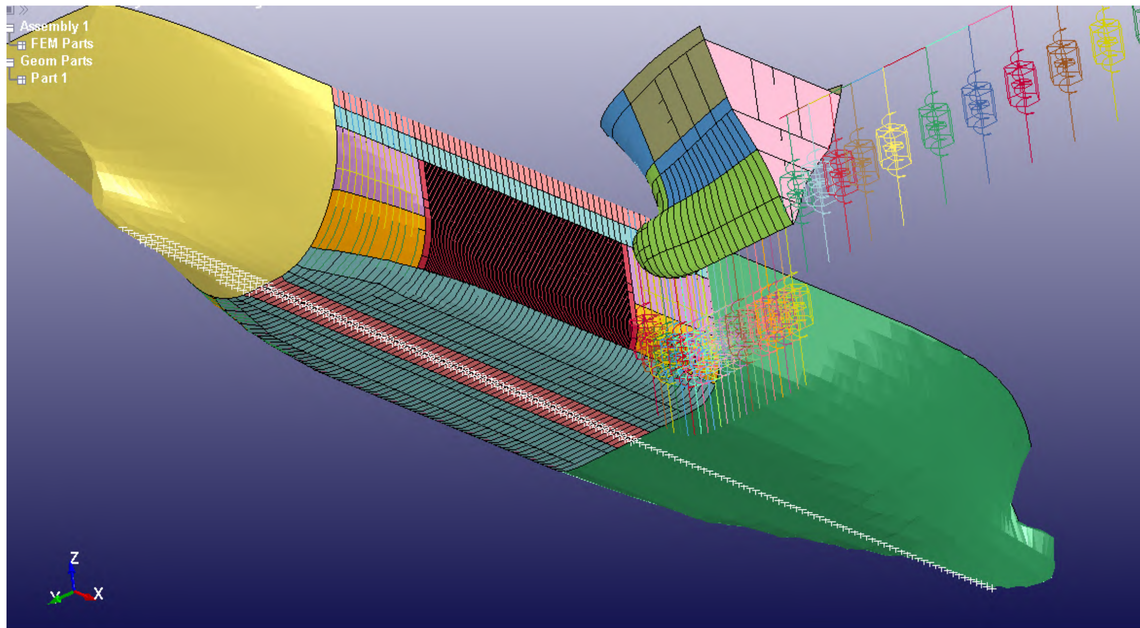
| | Prvi slučaj | Drugi slučaj |
|---|---|---|
| Rubni uvjeti: | Spriječeni pomaci na sredini broda | Spriječeni pomaci na dnu broda |

U prvom slučaju udarenom brodu su u čvorovima na sredini broda spriječeni pomaci u smjeru osi z na čime se osigurava da cijeli brod neće početi gibati gore-dolje, prikazano na slici 31.



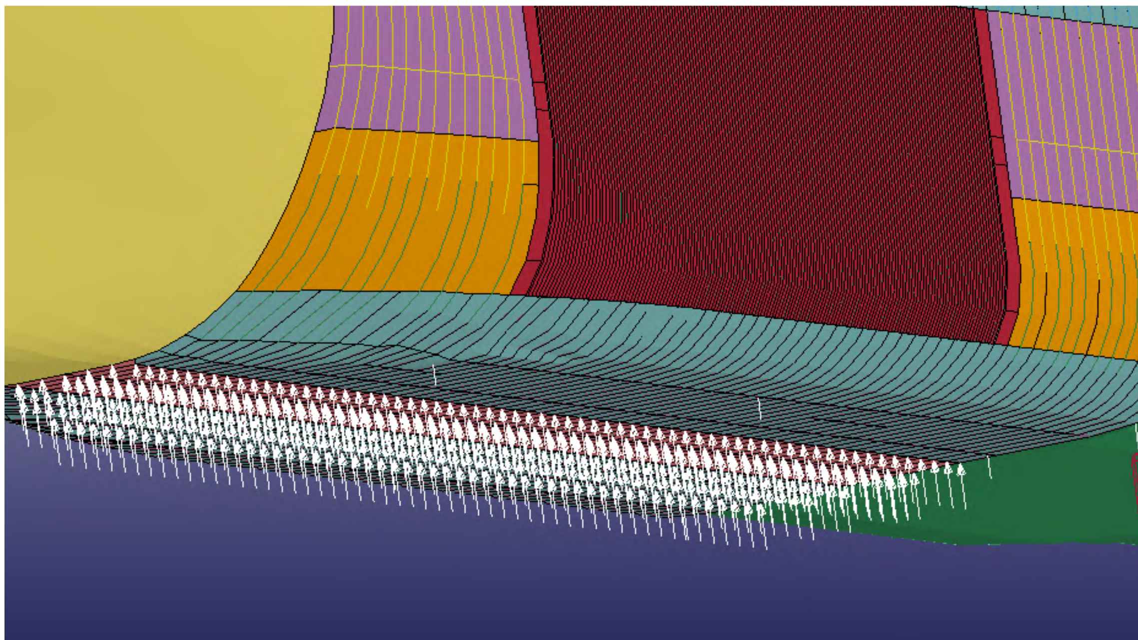
**Slika 31. Rubni uvjeti sredine broda**

U drugom slučaju udarenom brodu su u čvorovima na dnu broda spriječeni pomaci u smjeru osi z, što se vidi na slici 32.



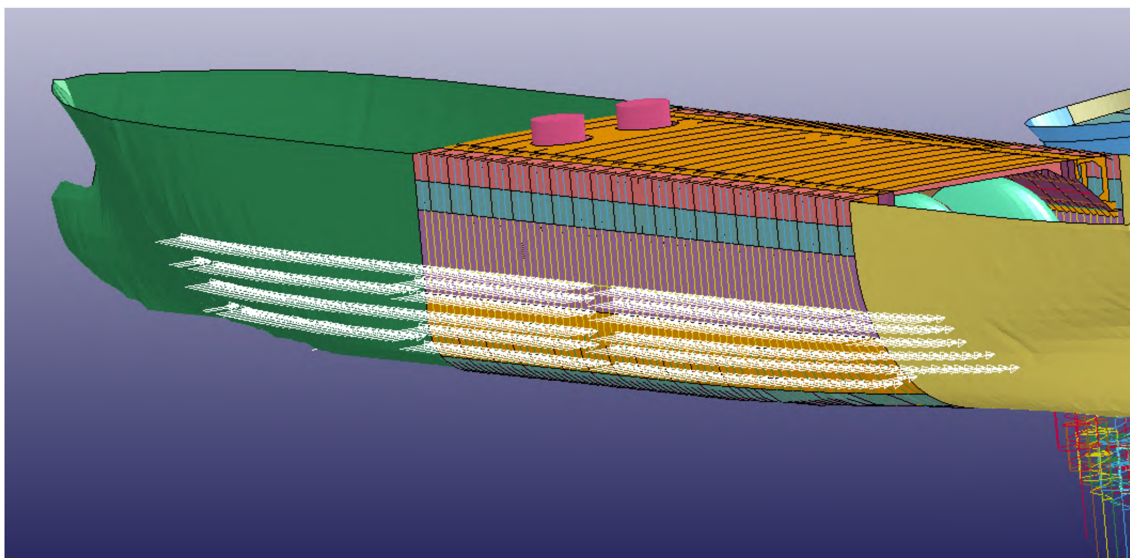

**Slika 32. Rubni uvjeti na dnu broda**

Kako je brod opterećen silom gravitacije bilo je potrebno dodati mu sile uzgona koje će brod držati na površini vode. Na slici 33. pokazane su te sile označene bijelim strelicama.



**Slika 33. Sile uzgona na sredini broda**

Kako bi sudar bio što realističniji, moralo se definirati i silu otpora vode prilikom sudara, odnosno inercijsku silu koja djeluje na boku udarenog broda koji nije izložen sudaru. Slika 34. prikazuje smjer tih sila.



**Slika 34. Inercijske sile na drugom boku broda**

Pri tome se javljaju dvije inercijske sile; jedna uslijed brzine, a druga uslijed ubrzanja. Inercijska sila uslijed brzine definirana je na sljedeći način :

$$F=\frac{1}{2}\rho \bullet VY^2\left[\text{referentničvor}\right] \bullet A$$

gdje je:

$\rho$……………………gustoća fluida, $\rho = 1000\,kg/m^3$

VY[ref.čvor]………..brzina u smjeru osi y u referentnom čvoru

A……………………površina na koju djeluje inercijska sila uslijed ubrzanja

Inercijska sila uslijed ubrzanja definirana je :

$$F=1.8 \bullet \Delta \bullet ACCY\left[\text{referentničvor}\right]$$

gdje je:

$\Delta$……………………..istisnina broda, $\Delta$=79 m

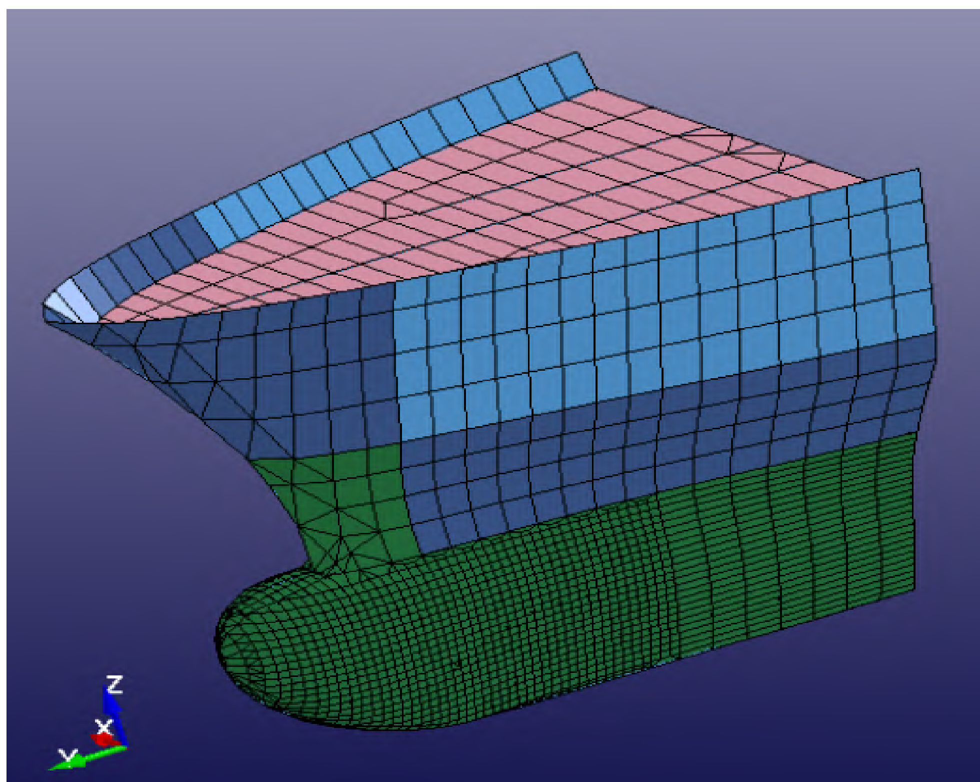
ACCY[ref.čvor]…….ubrzanje u smjeru osi y u referentnom čvoru

Referentni čvor je u oba slučaja krajnji čvor koncentrirane mase, na mjestu krme broda. On se pokazao kao dobar odabir referentnog čvora jer ne sudjeluje u stvaranju inercijske sile.

## 5.4. Udarajući brod

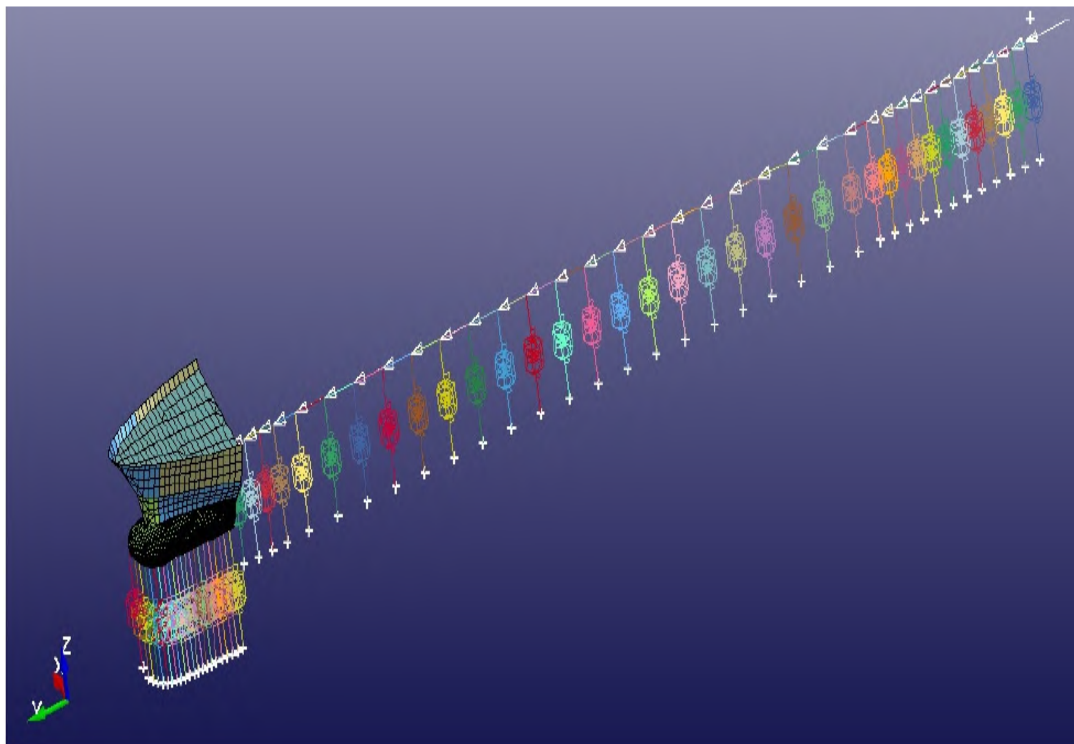
Kao brod koji udara u bok udarenog broda korišten je već postojeći model broda prilagođen potrebama analize sudara. Brod se sastoji od pramca modeliranog sa finom i grubom mrežom elemenata i grednih elemenata koji zamijenjuju trup broda. Na bulbu je modelirana fina mreža konačnih elemenata jer taj dio direktno sudjeluje u sudaru i od iznimne je važnosti da fina mreža daje što točnije i realističnije rezultate, slika 35.

Za izradu mreže korišteni su pločasti (plate) elementi sa 3 i 4 čvora po elementu[9]. Trup broda modeliran je kao gredni model podijeljen na 36 konačnih elemenata. Gredni konačni elementi su modelirani tako da svaki element ima isti poprečni presjek, iznosa $2.12\,m^2$ što se odnosi na vrijednost poprečnog presjeka glavnog rebra. Variranjem gustoća pojedinih greda ispoštovan je konstantan presjek glavnog rebra. Na modelu udarajućeg broda nalaze se opruge koje zamijenjuju hidrodinamičke sile uslijed uzgona.




**Slika 35. Pramac udarajućeg broda**[9]

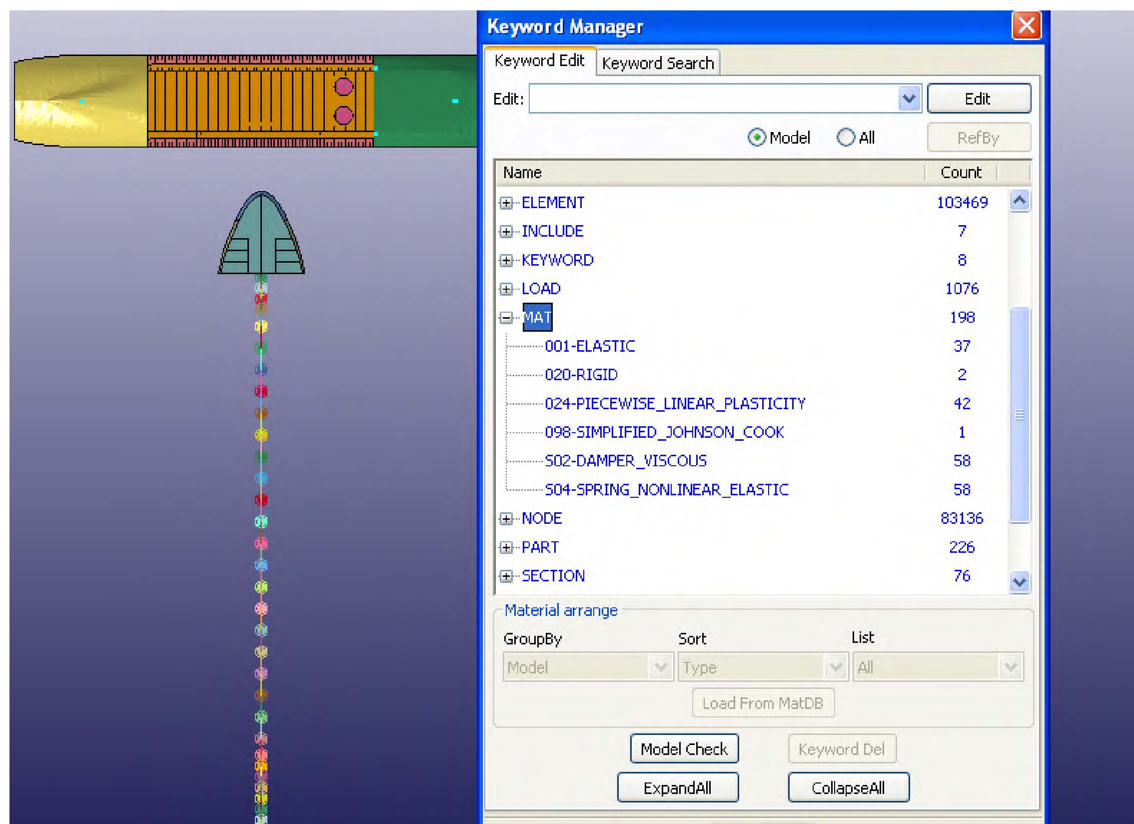
Udarajućem brodu, odnosno njegovim elementima i čvorovima nisu spriječeni pomaci i rotacije niti u jednom smjeru[9]. Donjim čvorovima opruga postavljeni su rubni uvjeti potpunog ukliještenja,odnosno spriječeni su im pomaci i rotacije u svim smjerovima kako bi se gibali točno onako kako se gibaju gornji čvorovi opruga koji su povezani sa grednim elementima broda. Na slici 36. bijelim križićima su označeni rubni uvijeti u donjim čvorovima opruga, a bijelim strelicama zadano opterećenje. Budući se udarajući brod treba gibati u smjeru osi y, svaki čvor grednih elemenata opterećen je silom u tom smjeru .




**Slika 36. Udarajući brod sa zadanim rubnim uvjetima i opterećenjima**[6]

## 5.5.Materijali

Dijelovi obaju brodova za analizu sudara napravljeni su od različitih materijala što se najbolje vidi u programu LS-Dyna ukoliko se otvori file core.k i ode na *Keyword manager/MAT* gdje se izlistaju svi materijali koji su se koristili tokom izrade modela,vidljivo na slici 37.




**Slika 37. Prikaz materijala u LS-Prepostu**

Naredba *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY odnosi se na plošne konačne elemente pramca i srednjeg dijela broda. To je elasto-plastični materijal kod kojeg se može proizvoljno definirati linearna ovisnost elstično-plastičnih deformacija o naprezanju. Mora se i definirati vrijednost deformacije pri kojoj nastupa lom materijala. Ukoliko se prilikom proračuna na nekom elementu postigne kritična vrijednost, element biva obrisan.

Naredba *MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK odnosi se na gredne elemente udarenog broda s posebnim kriterijem popuštanja. To je elasto-plastični materijal koji je moguće primijeniti na Belitschko-Schwer gredne elemente.

Naredba *MAT_RIGID odnosi se na dvodimenzionalne konačne elemente poprečne pregrade udarajućeg pramca i pregrade udarenog broda. To je materijal koji je beskonačno krut tako da određivanje gustoće materijala ili Youngovog modula elastičnosti nije bitno za naprezanja ali određuje masu pregrada.

Naredba *MAT_ELASTIC odnosi se na gredne konačne elemente udarajućeg broda. Kod takvih elemenata potrebno je definirati pravu krutost, a gustoća bi se trebala smanjiti što više kako ne bi imali preveliku masu greda koje za proračun nisu bitne ukoliko je masa broda koncentrirana u čvorovima grednih elemenata.

Naredba *MAT_SPRING_NONLINEAR_ELASTIC odnosi se na opruge koje simuliraju uzgonske sile i prigušne elemente. Taj materijal osigurava nelinearnu ovisnost sile o pomaku opruge.

## 5.6. Kriterij popuštanja( Failure criteria)

U slučaju sudara brodova dominira proces plastične deformacije i popuštanja elemenata trupa broda, čime se oslobađa ogromna količina energije. Stoga je veoma važno da se za analizu metodom konačnih elemenata, osim točnih podataka o materijalu, odrede i kriteriji popuštanja koji mogu proces sudara točno pratiti, a što ima značajan utjecaj na rezultate analize. Kriterij popuštanja mora biti veoma jednostavan jer mora biti u skladu sa podacima o materijalima, veličinom elemenata, plastičnom deformacijom elemenata. Stručnjaci Peschmann i Tornqvist navode da su za određivanje kriterija popuštanja najbitnije maksimalno dopuštene plastične deformacije, no ta tvrdnja ima svoja ograničenja. Naime, ponašanje pucanja tijekom sudara je ovisno o veličini elemenata. Pri tome je Peschmann naveo da se za debljinu pločastih elemenata između 5 mm i 12.5 mm uzima vrijednost faktora jednoličnog naprezanja $\varepsilon_g$ =1, a u rasponu debljine od 12.5 mm do 20 mm uzima vrijednost $\varepsilon_g$ =0.08. Peschmann stoga daje ovisnost kriterija pucanja i veličine elementa za naš slučaj :

$$\varepsilon_f = 0.08 + 0.65\frac{t}{l}$$

Gdje su :

$\varepsilon_f$ - kriterij popuštanja

t – debljina elementa

l– prosječna veličina elementa

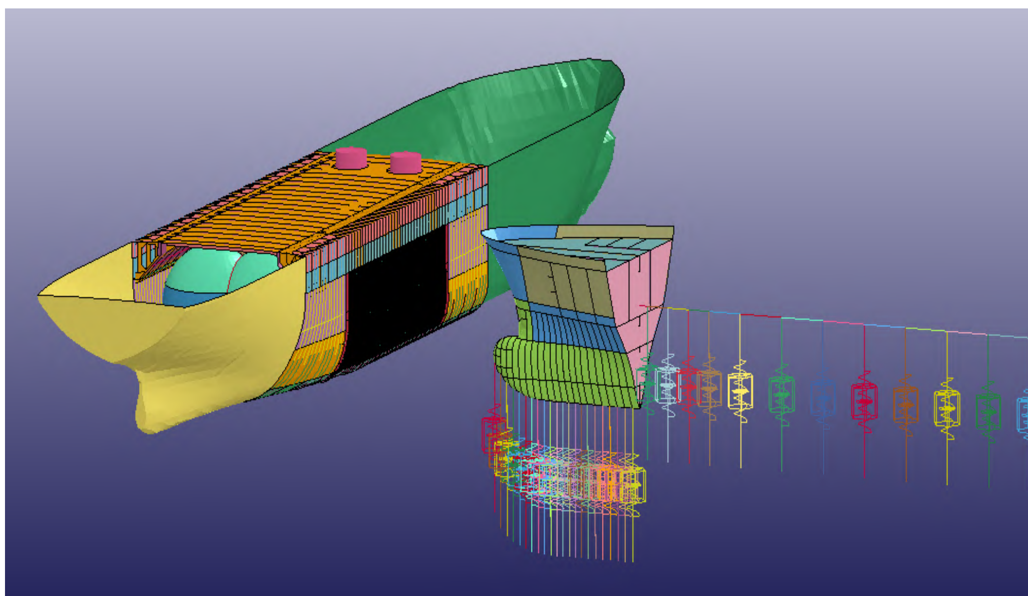
Koristeći Peschmannov kriterij, napravljeni su kriteriji popuštanja na prethodno opisanim modelima brodova kako bi se dobili što točniji rezultati ispitivanja.

# 6. NUMERIČKA ANALIZA I REZULTATI

Kako bi mogli što bolje analizirati i usporediti rezultate analize, potrebno je imati više slučajeva sudara. U završnom radu analizirat će se 5 slučajeva istog sudara, slika 38. no sa promijenjenim parametrima. To se prije svega odnosi na rubne uvjete, položaj udarajućeg broda te dodatnih ojačanja sandwich konstrukcije. Za zadnji slučaj sudara koji je naveden u tablici 3. modele sam preuzeo od kolegice Blanke Aščić te sam im naknadno promijenio kriterij popuštanja udarajućeg broda i zamijenio materijale grednih elemenata sa Johnson-Cook materijalom.

**Tablica 3. Prikaz slučajeva sudara**

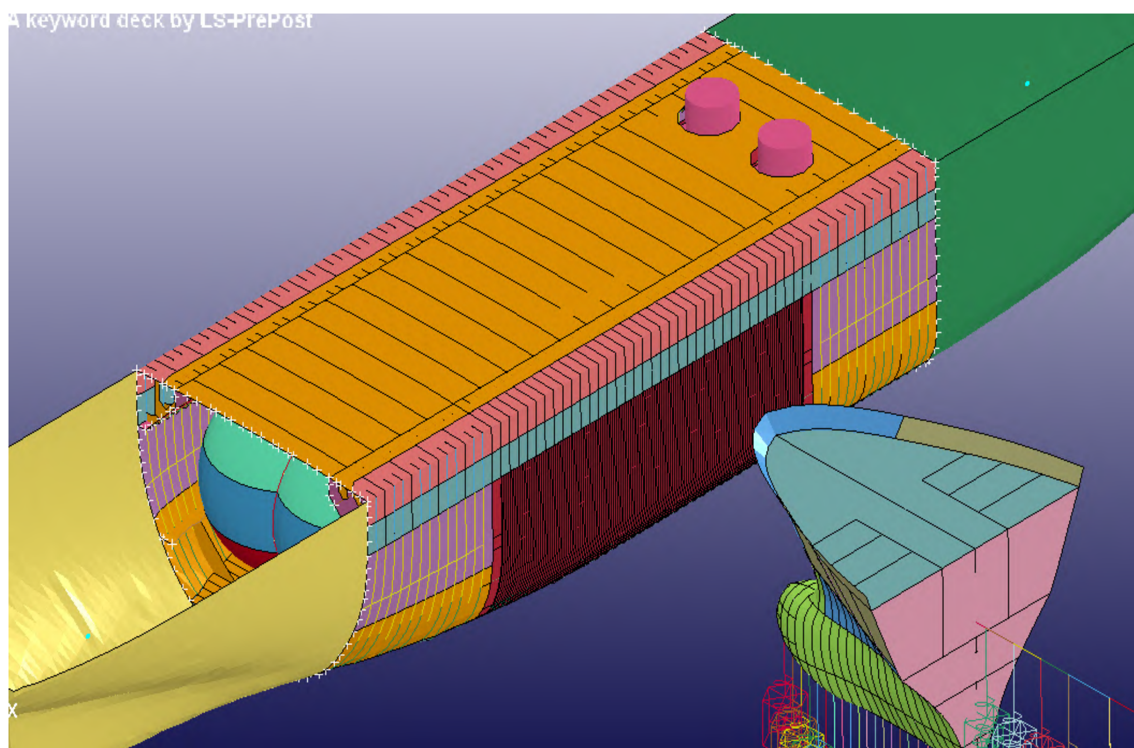
| Sudar | mreža | Rubni uvjeti | Gaz |
|---|---|---|---|
| Osnovni slučaj(sudar1) | Sandwich | sredina broda (Slika 31.) | 0 |
| Sudar 2 | Sandwich | dno broda(slika 32.) | 0 |
| Sudar 3 | Sandwich | Sredina broda(slika31) | +1.5 m |
| Sudar 4 | Sandwich+ojačanja | sredina broda(slika31) | 0 |
| Sudar 5 | Klasična struktura | Sredina broda(slika31) | 0 |



**Slika 38. Općeniti slučaj sudara**

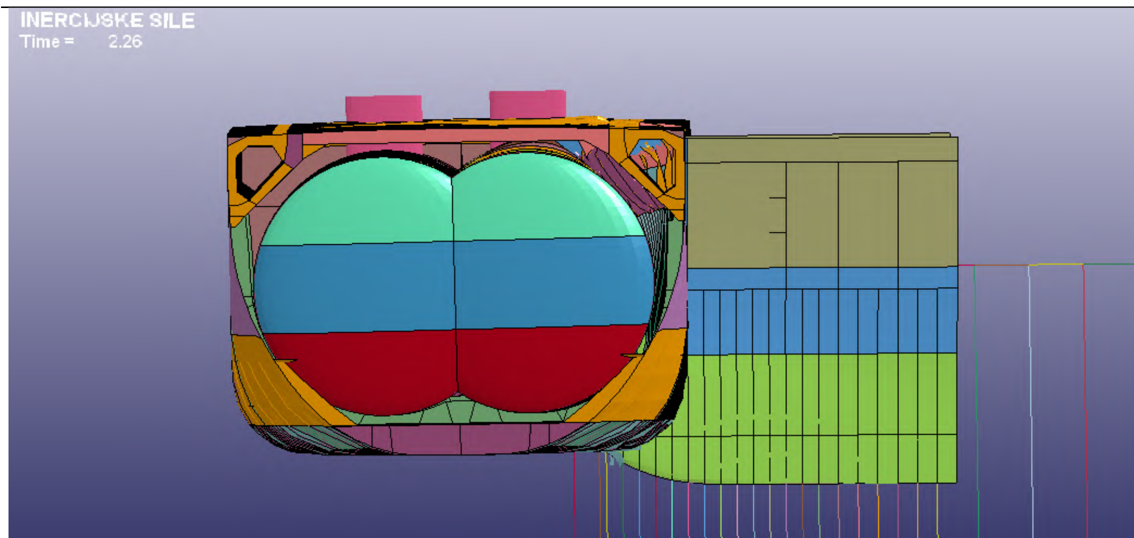
## 6.1. Sudar 1

U slučaju sudara 1 udarenom brodu, kao što je ranije navedeno, zadani su rubni uvjeti koji fiksiraju čvorove na sredini broda u odnosu na smjer osi z te spriječavaju gibanje broda gore-dolje, slika 39. Analizira se vrijeme sudara od 5 sekundi. Udarajući brod udara o bok udarenog broda pod kutem od 90° , u dio ojačan sandwich konstrukcijom. Udarajući brod je na početku analize udaljen 5 metara od udarenog broda, a sudar se dogodi nakon 1.25 sekundi nakon što udarajući brod postigne maksimalnu brzinu od 8 m/s. Nakon sudara udarajući brod nastavlja gurati udareni brod .



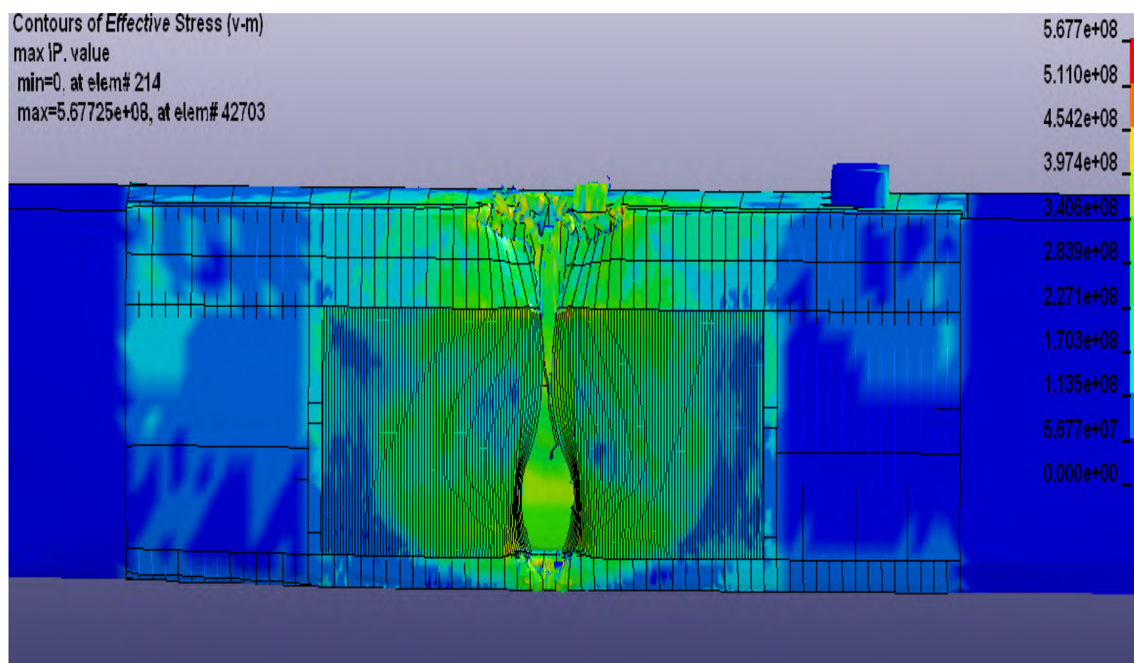

**Slika 39. Rubni uvjeti osnovnog slučaja**

Na slici 40. u trenutku 2.26 sekundi od početka analize sudar je gotov i brodovi se zajedno sa smanjenom brzinom nastavljaju gibati. Pojedini elementi udarenog elementa dostižu velika naprezanja, te na kraju pucaju.




**Slika 40. Prikaz osnovnog slučaja sudara**

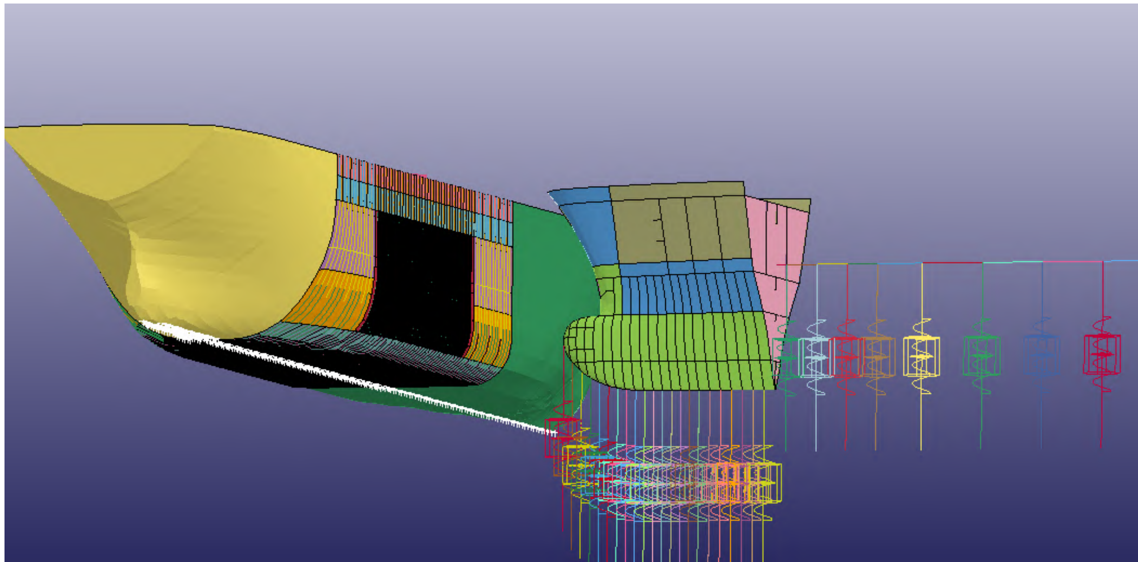
Slika 41. prikazuje ukupna naprezanja boka udarenog broda na samom kraju analize sudara.



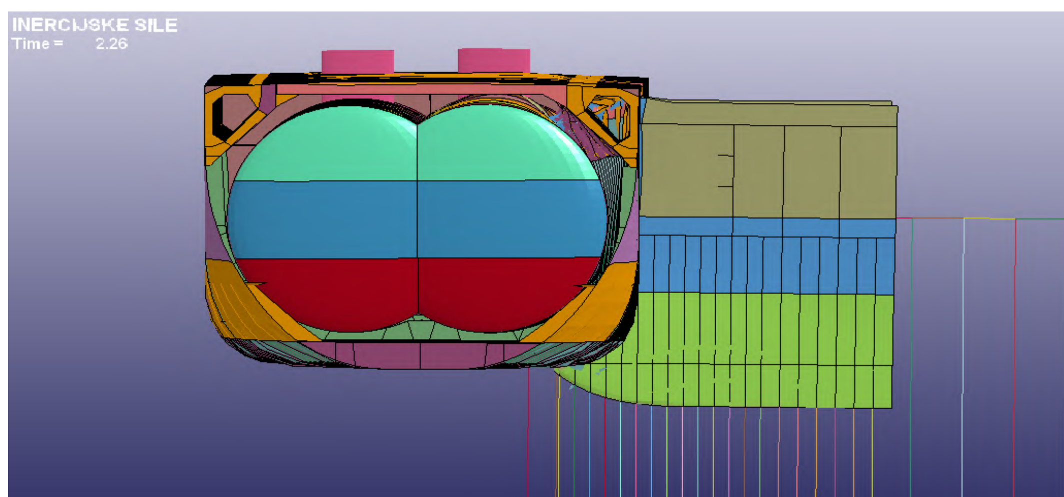

**Slika 41. Von Misses naprezanja boka broda u osnovnom slučaju**

## 6.2. Sudar 2

Za razliku od osnovnog slučaja, gdje su rubni uvjeti bili zadani na čvorovima elemenata u sredini udarenog broda, u slučaju sudara 2 htjelo se ispitati moguće naginjanje udarenog broda uslijed sudara. Stoga su rubni uvjeti bili promijenjeni i spriječeni su pomaci u smjeru osi z na čvorovima na dnu broda, slika 42. Scenarij sudara je ostao isti; brod udara pod kutem od 90° u bok udarenog broda gdje se nalazi sandwich konstrukcija istom brzinom kao i u prethodnom slučaju. Slika 43. prikazuje slučaj sudara 2 u trenutku kraja sudara.



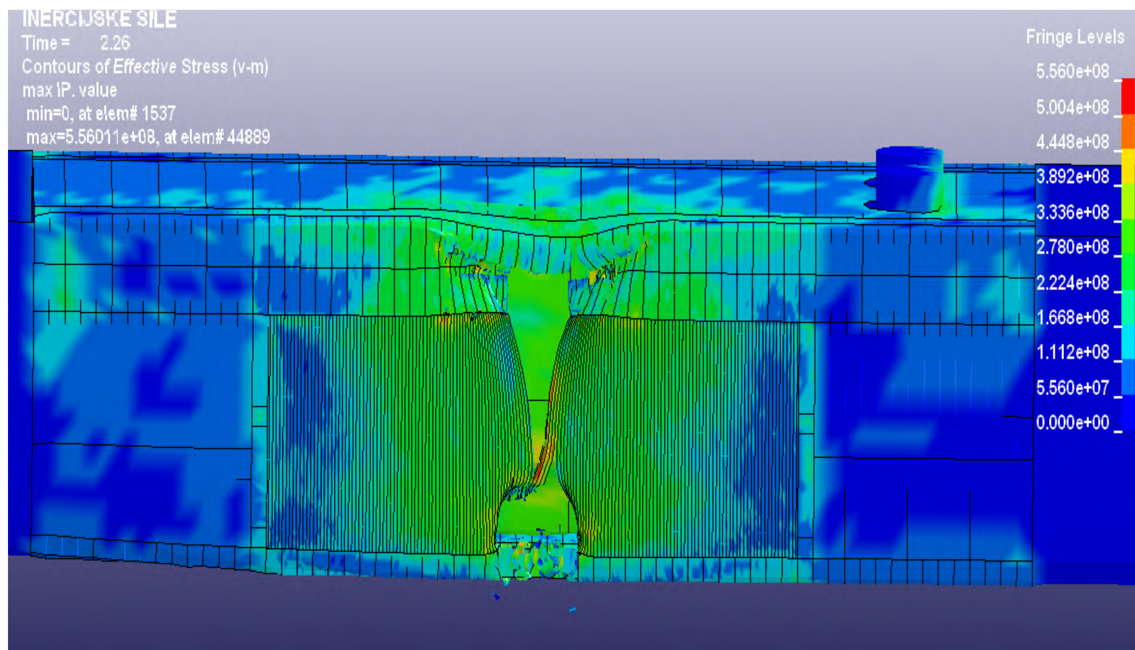
**Slika 42. Rubni uvjeti slučaja sudara 2**




**Slika 43. Prikaz slučaja sudara 2**

U slučaju sudara 2 spriječeno je naginjanje udarenog broda u trenutku sudara, za razliku od osnovnog slučaja, slika 40. Nakon prodiranja udarajućeg broda u bok drugog broda, fiksiranjem čvorova na dnu u smjeru osi z, dolazi do laganog zanošenja brodova koji se nakon sudara u trenutku 2.26 sekundi od početka analize nastavljaju gibati istom brzinom.

Na slici 44. prikazana su ukupna naprezanja boka broda u 2.26 sekundi sudara koja se ne razlikuju mnogo od naprezanja osnovnog slučaja sudara, slika 41.

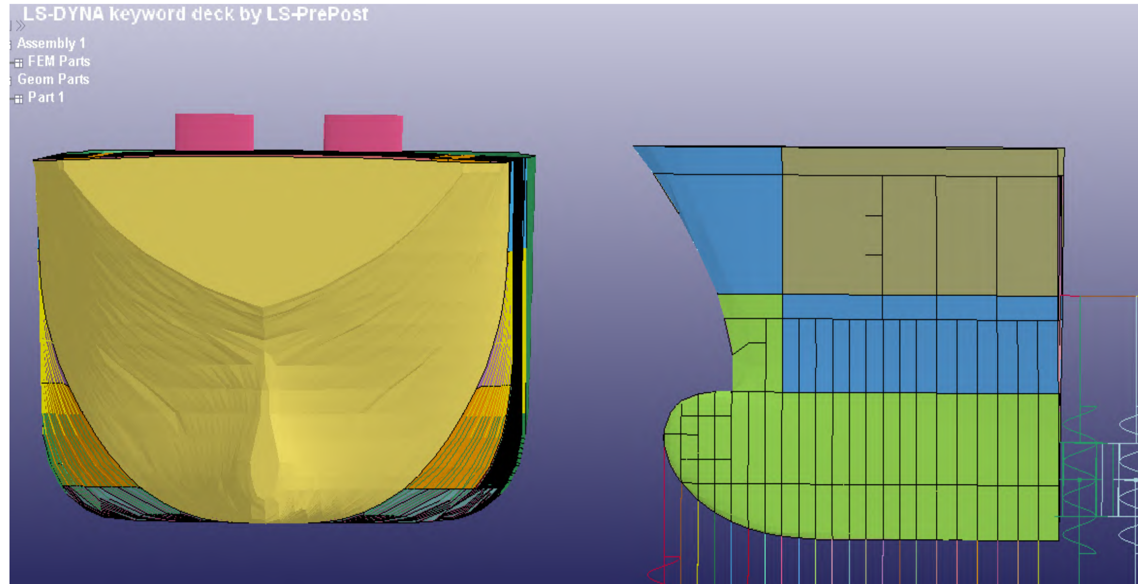



**Slika 44. Von Misses naprezanja boka broda u slučaju sudara 2**

## 6.3. Sudar 3

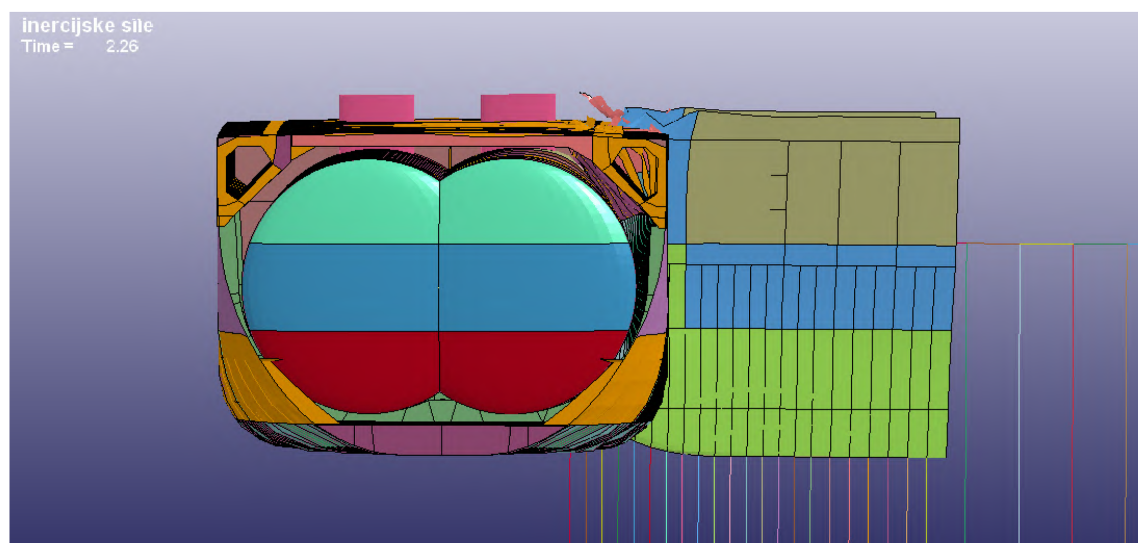
U slučaju sudara 3 izvršena je analiza nakon što je udarajućem brodu smanjen gaz, slika 45. Time se nastojalo ispitati hoće li udarajući brod u trenutku udara više oštetiti bok broda i prodrijeti svojim bulbom do spremnika. Ostatak parametara se nije mijenjao u odnosu na prethodni slučaj sudara.

Na slici ispod se vide brodovi prije trenutka sudara. Vidljivo je da će bulb udarajućeg broda udariti cijelom svojom visinom u bok udarenog broda te se stoga treba ispitati naprezanja spremnika prilikom takvog slučaja sudara. Slika 46. prikazuje kraj sudara slučaja 3.



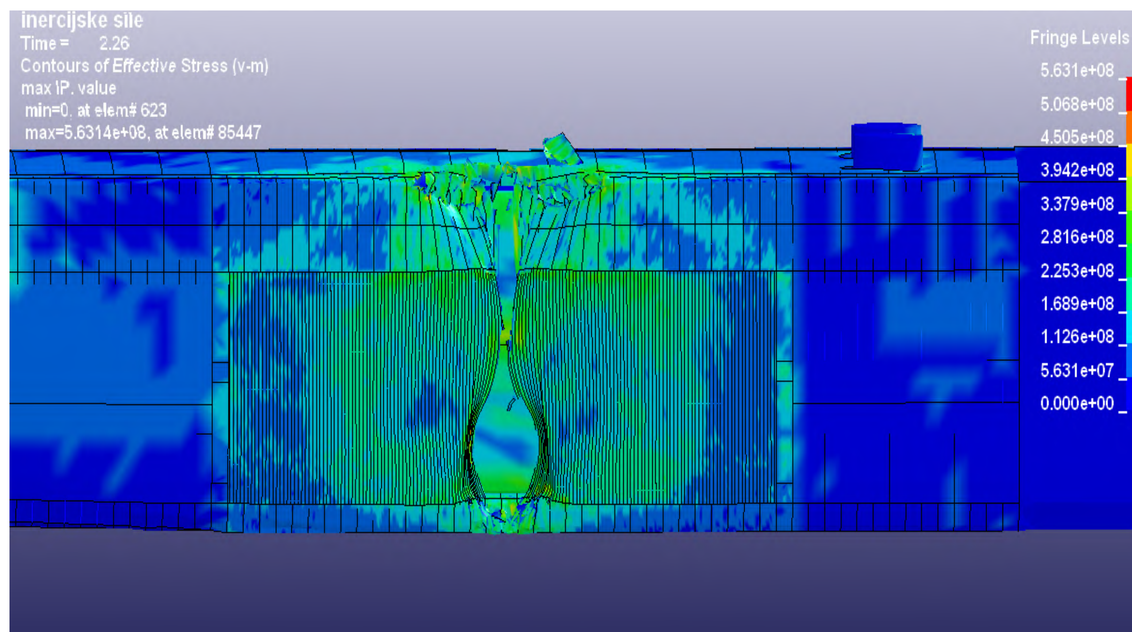

**Slika 45. Prikaz smanjenog gaza u slučaju sudara 3**

Provedenom analizom potvrđeno je da prilikom sudara dolazi do manjih oštećenja boka broda nego u prethodnim slučajevima, te manje elemenata postiže kritična naprezanja. Unatoč velikim naprezanjima nastalim uslijed sudara sandwich konstrukcija je pomogla u spriječavanju prodiranja broda .




**Slika 46. Prikaz slučaja sudara 3**

Slika 47. prikazuju naprezanja boka udarenog broda na samom kraju sudara.

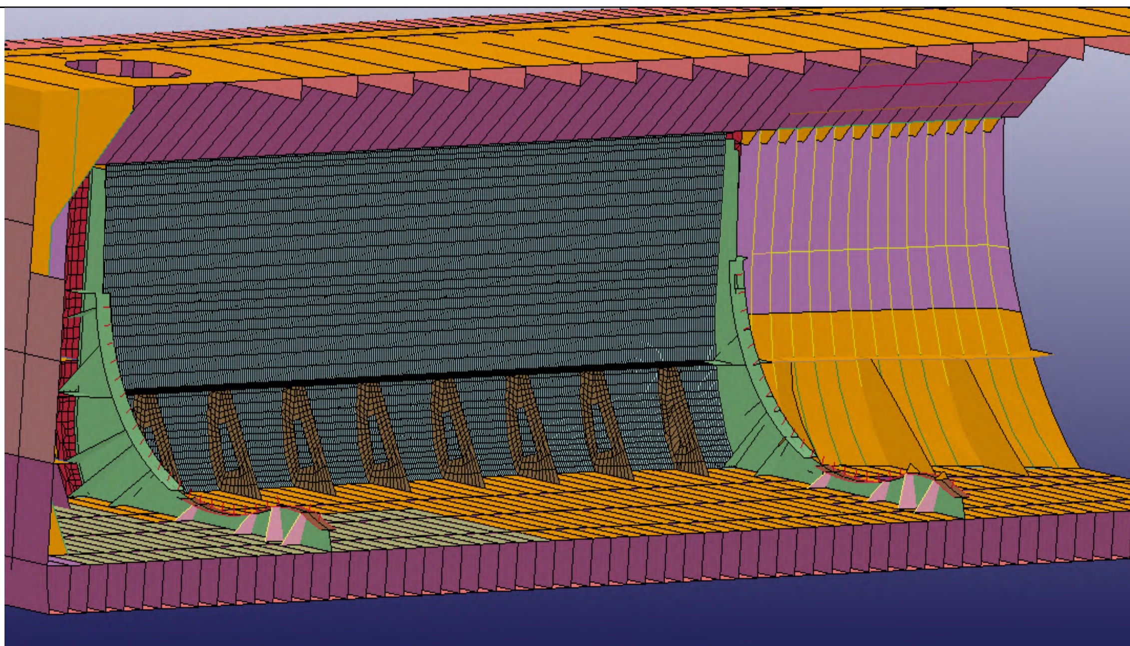



**Slika 47. Von Misses naprezanja boka broda u slučaju sudara 3**

## 6.4. Sudar 4

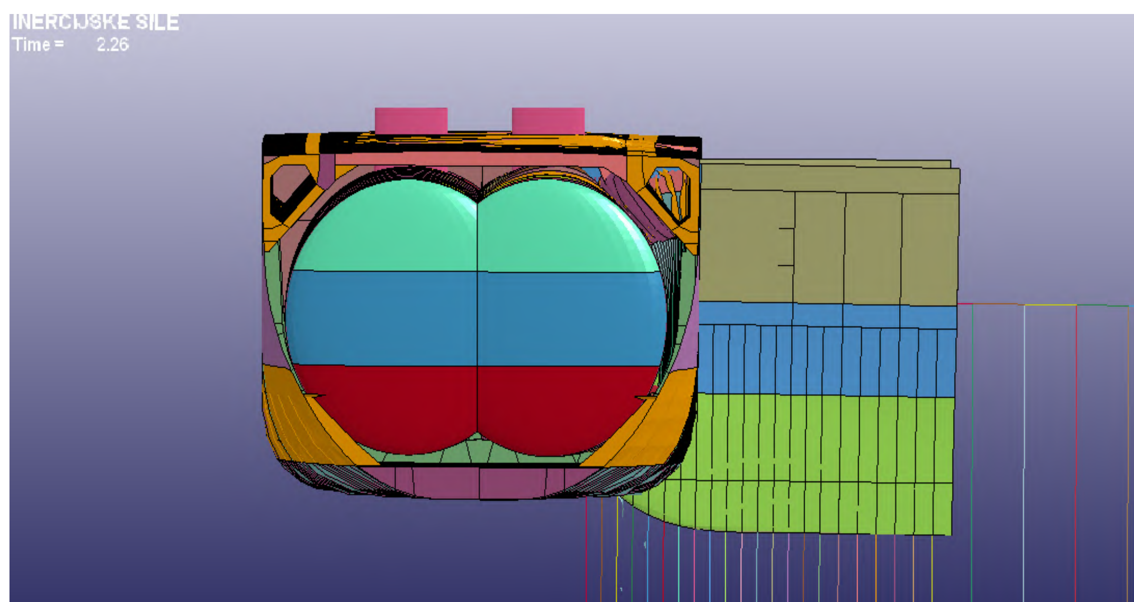
Nakon provedene analize triju slučajeva sudara rezultati naprezanja boka udarenog broda pokazuje da sandwich konstrukcija ne daje željene rezultate i da ju je potrebno poboljšati. Ne želeći povećavati debljinu konstrukcije, a samim time i povećati masu cijelog broda, odučeno je da će se dodati ojačanja na unutarnjoj ploči sandwich konstrukcije. Prikaz dorađenog modela boka broda koji sudjeluje u sudaru vidi se na slici 48. Sandwich konstrukcija tako je ojačana duž sredine boka, između dva sedlasta oslonca. Na slici 49. prikazan je trenutak na kraju sudara, kao i u prethodnim analizama.

Rezultati pokazuju da se dodatnim ojačanjem smanjuje malo ipak smanjuje prodiranje udarajućeg broda, a ukupna naprezanja nešto su manja u odnosu na rezultate prethodnih slučajeva sudara.



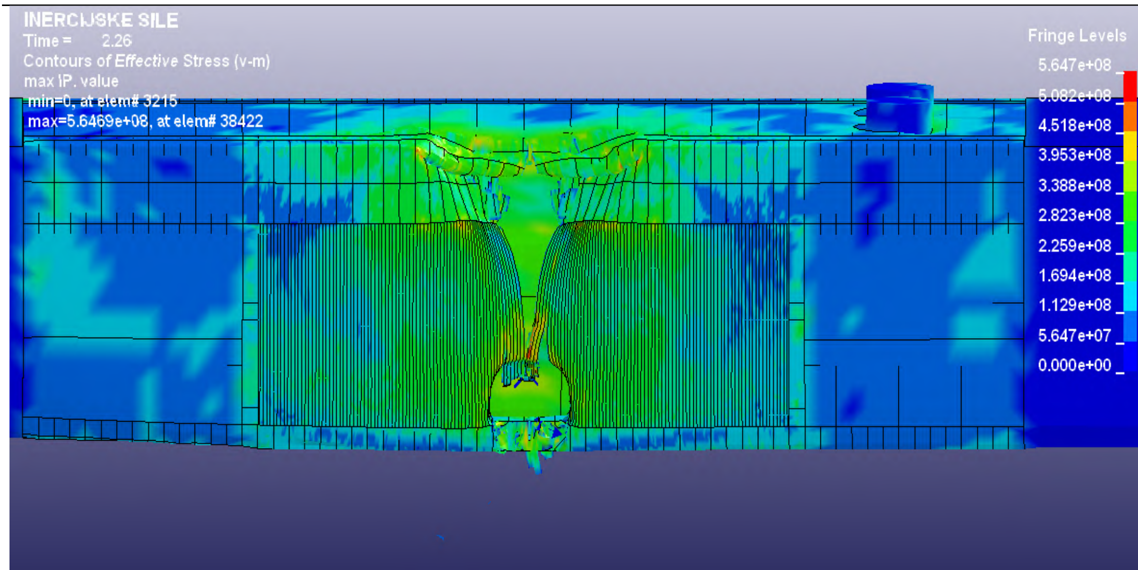
**Slika 48. Ojačanja sandwich konstrukcije**

.




**Slika 49. Prikaz slučaja sudara 4**

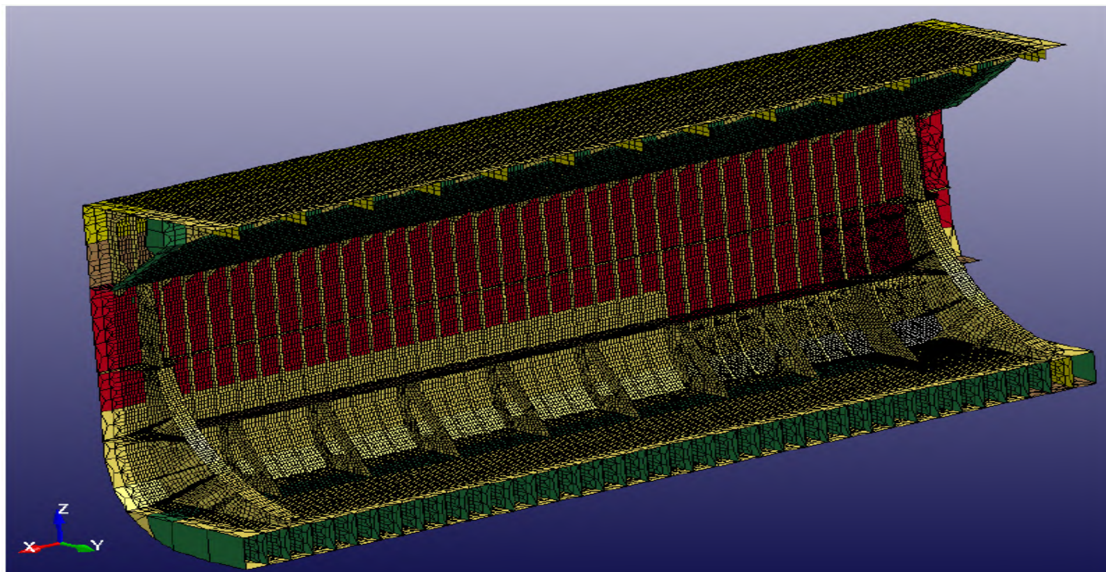
Slika 50. prikazuje ukupna naprezanja koja su manja u odnosu na sandwich konstrukciju bez naknadno dodanih ojačanja




**Slika 50. Von Misses naprezanja boka broda u slučaju sudara 4**

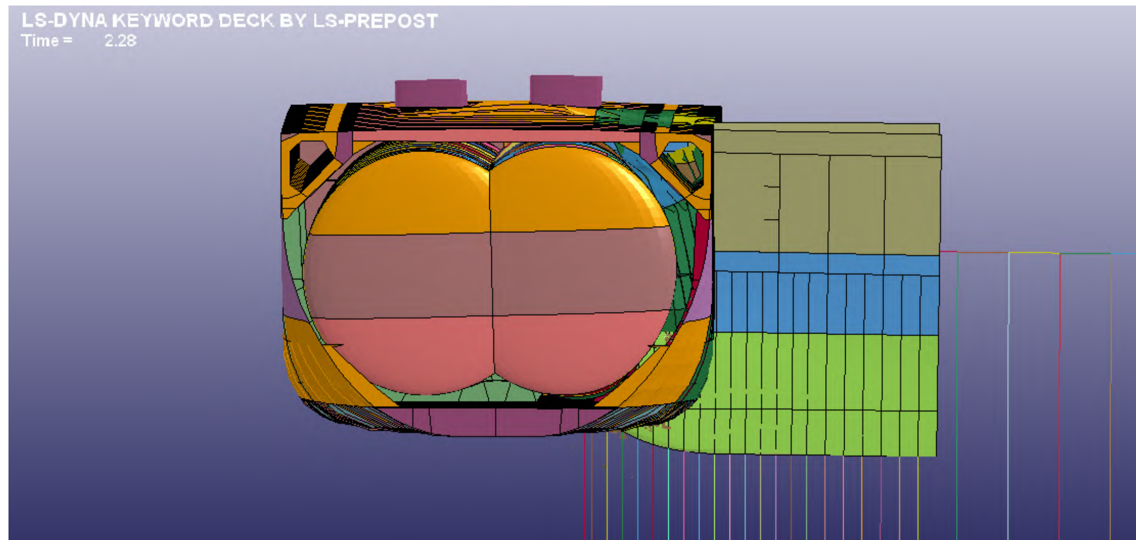
## 6.5 . Sudar 5

Za zadnji slučaj analize sudara iskorišteni su modeli kolegice Blanke Aščić koja je radila analizu različitim brzinama sudara. Na njenom modelu udarenog broda, bez sandwich konstrukcije, promijenjeni su materijali grednih elemenata sa Johnson-Cook materijalima, te su na udarajućem brodu smanjeni faktori popuštanja pucanja elemenata. Ta analiza je bila potrebna kako bi se mogli usporediti rezultati analiza različitih sudara sa i bez sandwich konstrukcije. Slika 49. prikazuje jednostruku oplatu boka broda koji sudjeluje u sudaru.



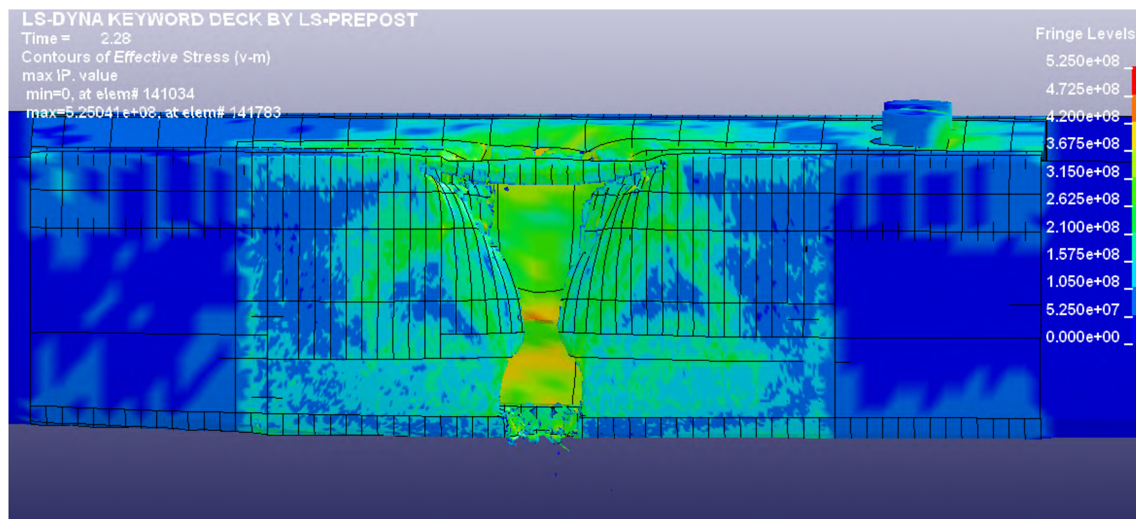

**Slika 51. Jednostruka oplata boka udarenog broda**

Slika 52. prikazuje nešto veće prodiranje udarajućeg broda, nego u prethodnim slučajevima sudara sa sandwich konstrukcijom.




**Slika 52. Prikaz slučaja sudara 5**

Na slici 53. može se vidjeti da su deformacije boka broda mnogo veće, odnosno mnogo više elemenata puca nakon dostizanja kritičnog naprezanja zbog veće dubine prodiranja udarajućeg broda.

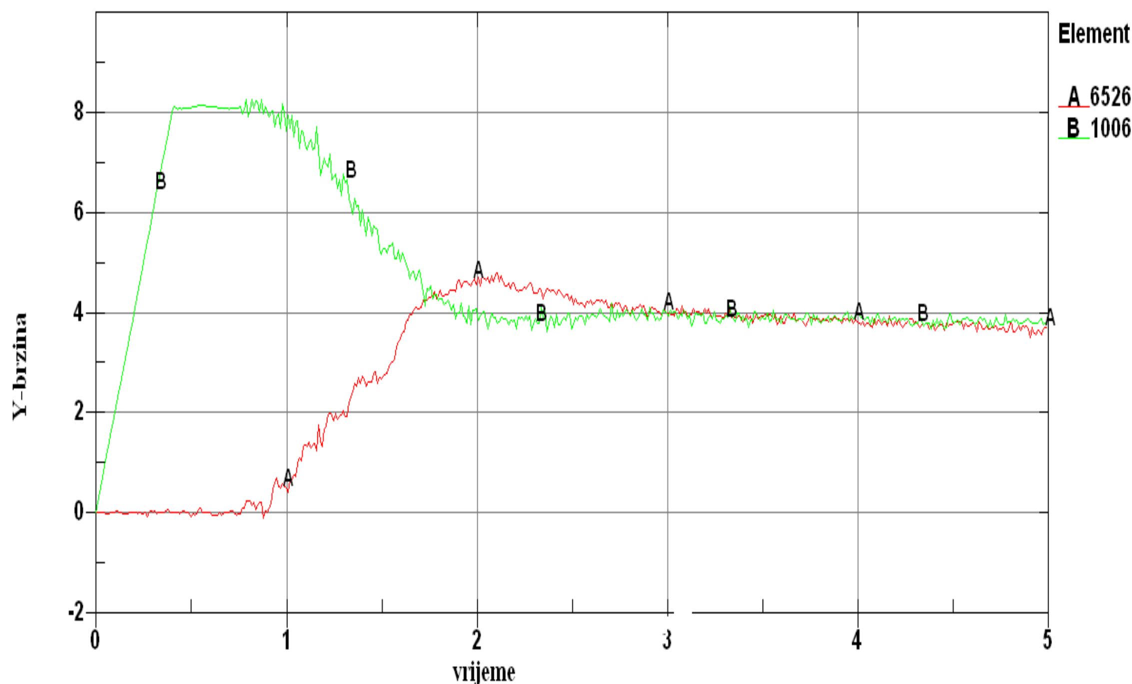



**Slika 53. Von Misses naprezanja boka broda u slučaju sudara 5**

## 6.6. Rezultati i usporedbe analiza sudara

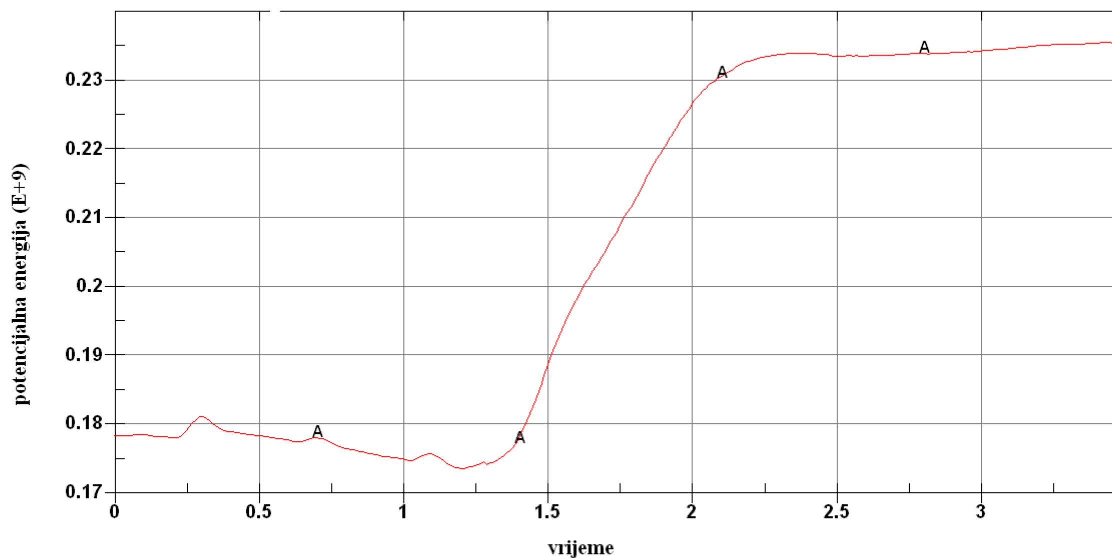
Nakon provedenih analiza promatranih sudara može se vidjeti da su prilikom sudara nastala velika naprezanja i velike deformacije u svih 5 promatranih slučajeva. Usporedimo li sudare međusobno, vidljivo je da najveće deformacije ima zadnji slučaj sudara u kojem je najviše elemenata puknulo, što se vidi na prethodnoj slici. Kao najbolji pokazao se 4. slučaj u kojem su se dodala ojačanja sandwich konstrukciji i nastale su manje deformacije nego u drugim slučajevima. Prva 3 slučaja sudara imaju jako slične rezultate naprezanja i deformacija čime se zaključuje da elementi sandwich konstrukcije ipak moraju biti malo deblji ukoliko se žele bolji rezultati.

Ukoliko gledamo brzine brodova u sudaru, vidi se da udarajući brod ubrzava do brzine od 8 m/s, te prilikom sudara sa drugim brodom naglo smanjuje svoju brzinu. To se jasno vidi na dijagramu na slici 54. koji pokazuje da se nakon sudara oba broda nastavljaju kretati nekom zajedničkom brzinom.

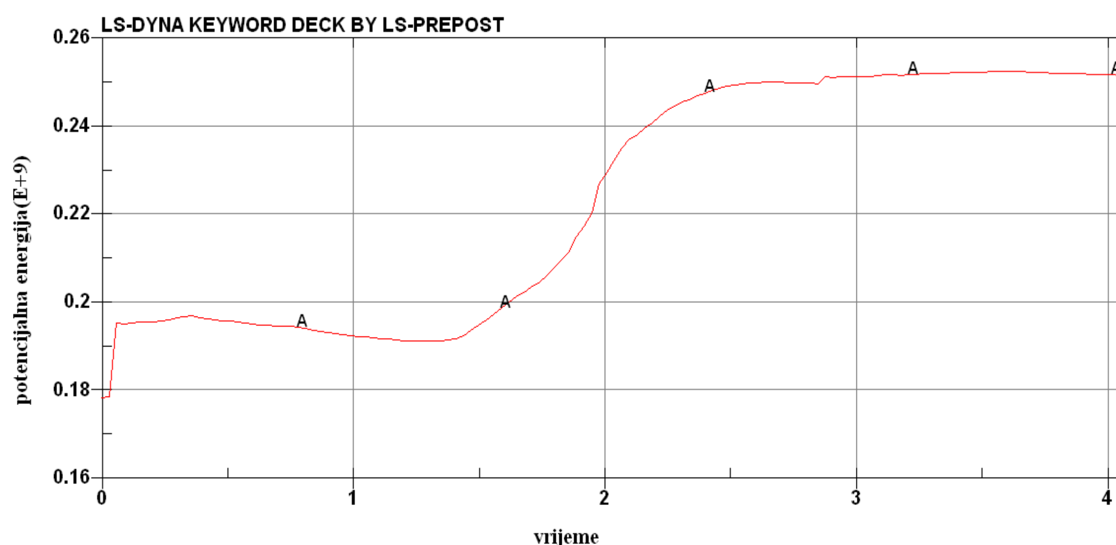



**Slika 54. Dijagram brzina brodova, sudar 1**

Posljedica sudara je značajna promijena energije sustava. Uspoređuju se osnovni slučaj sudara sa sandwich konstrukcijom i slučaj sudara sa jednostrukom oplatom. Brodovi prije sudara imaju veliku potencijalnu energiju. Na slici 55. prikazana je potencijalna energija broda sandwich konstrukcije. Iz dijagrama se vidi da se potencijalna energija drastično povećava u trenutku sudara. U slučaju sudara sa jednostrukom oplatom brodovi imaju u početku nešto veću potencijalnu energiju., slika56

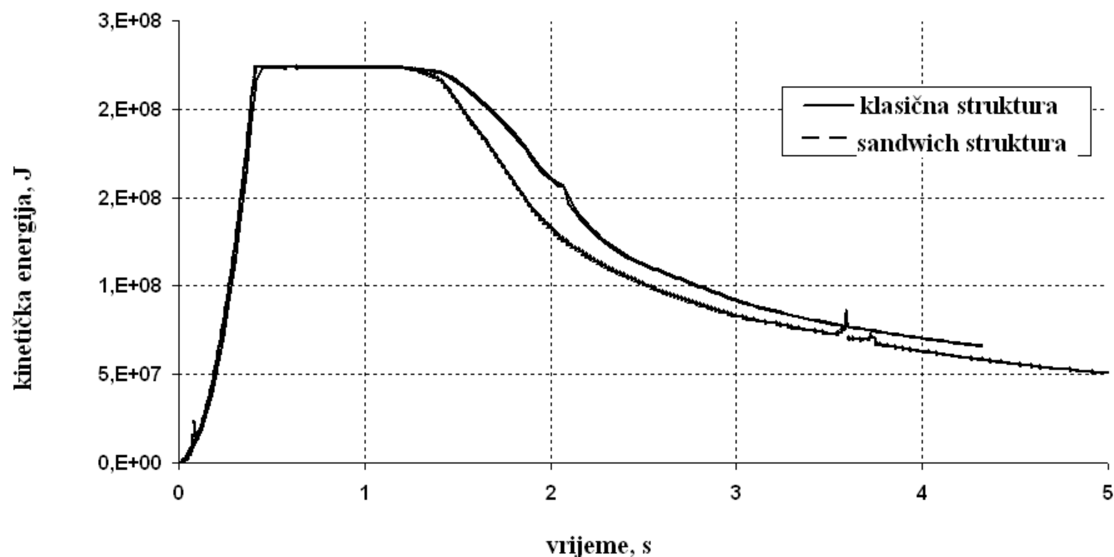



**Slika 55. Dijagram potencijalne energije sudara broda s sandwich konstrukcijom**



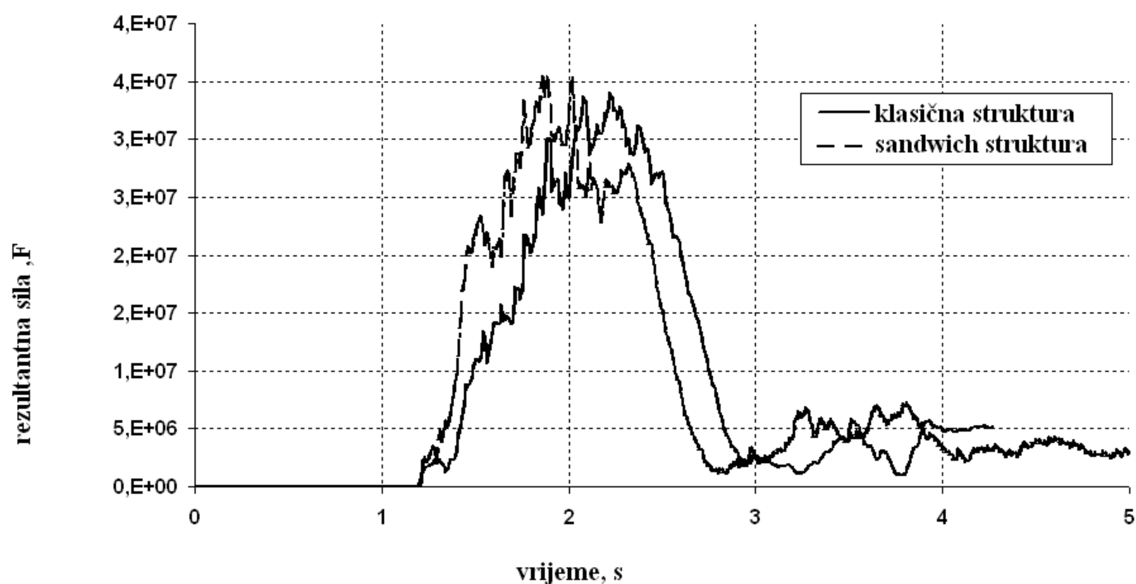

**Slika 56. Dijagram potencijalne energije sudara broda s jednostrukom oplatom**

Također se oslobađa golema kinetička energija koju prilikom sudara bok broda preuzima na sebe, što se vidi na slici 57. Usporedbom kinetičkih energija osnovnog slučaja sudara sa sandwich konstrukcijom i sudara s jednostrukom oplatom, zaključuje se da sudar sa sandwich strukturom oslobađa manje kinetičke energije.




**Slika 57. Usporedba kinetičkih energija sudara klasične i sandwich strukture**

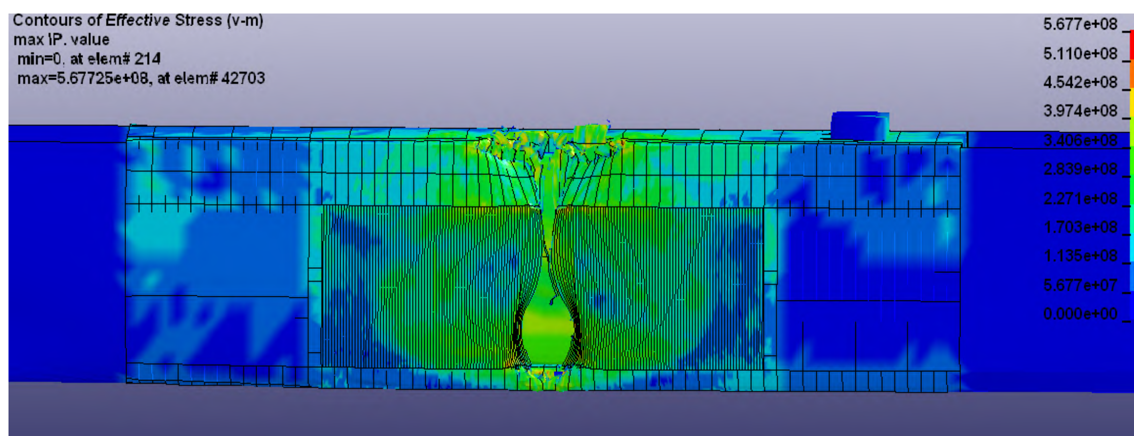
Također se može napraviti usporedba rezultantnih sila tijekom sudara osnovnog slučaja sudara broda sa sandwich konstrukcijom i broda sa jednostrukom oplatom, slika 58.



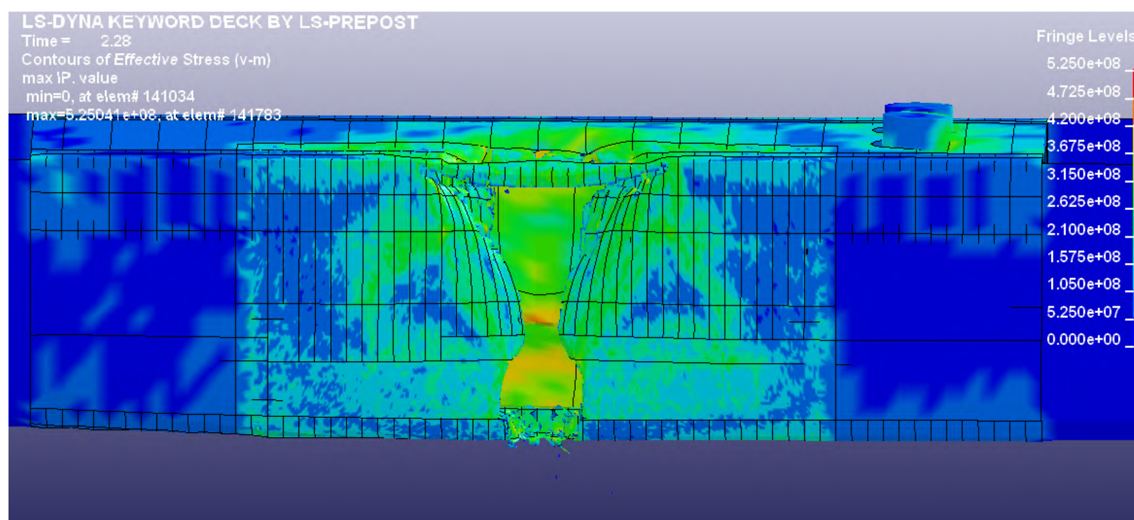

**Slika 58. Usporedba rezultantnih sila sudara klasične i sandwich strukture**

Ponašanje krivulja sila, logično prati krivulje kinetičkih energije. Do trenutka sudara nema rezultantnih sila, a sa sudarom rastu do neke vrijednosti te se nakon što udarajući brod prodre u bok broda smanjuju na konačnu vrijednost.

Uspoređujući plastičnu deformaciju i pucanje elemenata tijekom sudara, sa slika 42. i 53. se vidi da osnovni slučaj sa sandwich konstrukcijom ima manje deformacije u odnosu na klasičnu jednostruku oplatu broda, odnosno manje elemenata je puknulo.




**Slika 41. Von Misses naprezanja boka broda osnovnog slučaja sudara**




**Slika 53. Von Misses naprezanja boka broda u slučaju sudara 5**

# 7. ZAKLJUČAK

Kao dostupan, jeftin i čist izvor energije, prirodni plin postaje sve važniji dio svjetske energetske strategije. Može ga se koristiti za proizvodnju energije, grijanje, promet, proizvodnju goriva, plastike i druge robe. Plin se transportira cijevovodima, ali u velikoj mjeri i brodovima. Upravo zato sigurnost tog dijela pomorskog transporta mora biti izrazito visoka i regulirana. Do danas nije zabilježena niti jedna nesreća koja je odnijela ljudske živote ili uzrokovala ekološku katastrofu. No sve većim udjelom prijevoza plina brodovima potrebno je konstruirati što sigurnije brodove kako bi se i u budućnosti mogle izbjeći havarije.

Upravo je poboljšanje otpornosti brodova primjenom sandwich konstrukcije bila tema ovog nadasve zanimljivog završnog rada. Rad sa numeričkom analizom je izrazito složen i kompleksan zbog brojnih faktora koji se moraju uzeti u obzir prije samog modeliranja konstrukcije. Odabir pravog materijala, odabir dovoljno velikog broja konačnih elemenata i same geometrije kako bi dobili što točnije rezultate i više je nego zahtjevan posao. Stoga je moj zadatak u sklopu ovog završnog rada bio na dobivenim modelima broda napraviti sandwich konstrukciju dovoljno fine mreže konačnih elemenata, prilagoditi je zatim ostatku broda, dodati potrebne rubne uvjete i ograničenja te na kraju analizirati različite slučajeve sudara kako bi dobili optimalnu konstrukciju dovoljno otpornu i sigurnu u slučaju stvarnog sudara. Nažalost, dobiveni rezultati ukazuju na to da je ova sandwich konstrukcija ipak preslaba da bi izdržala takva naprezanja koja se događaju uslijed navedenog sudara iako pokazuje bolje rezultate otpornosti i deformacija u odnosu na jednostruku oplatu što je navedeno u provedenoj analizi. Kako bi se poboljšala sandwich konstrukcija, potrebno je izvršiti male promijene u debljini samih ploča i jezgre, a možda i razmisliti o čvršćem materijalu u skladu s tehnologijom zavarivanja koji će onda dati bolje rezultate na ispitivanju. Samim dodavanjem ojačanja na sandwich konstrukciju smanjene su deformacije i naprezanja, stoga bi se i s tim valjalo pozabaviti u budućnosti. Također bi bilo dobro napraviti analizu naprezanja samog spremnika u slučaju sudara.

# 8. LITERATURA

[1] Jurica Sorić: Metoda konačnih elemenata, Golden marketing 2004.

[2] Klanac, S. Ehlers, Jelovica: Optimization of crashworthy marine structures.

[3] Klanac, S.Ehlers & K.Tabri, Rudan, J. Broekhuijsen: Qualitative design assessment of crashworthy structures, 2005.

[4] Livermore Softvare Technology Corporaton: LS-DYNA, Keyword Users Manual, 2002

[5] Klanac : Optimal design of steel sandwich panel application in ships

[6] Aščić B.: Analiza otpornosti na sudar LPG brodova sa spremnicima tipa C, Zagreb, 2012.

[7] Simon, K., Malnar, M., Vrzic, V.: Pregled procesa ukapljivanja prirodnog plina Zagreb,2009.

[8] Noble P.: A short history of LNG shipping 1959-2009.

[9] Srdelić, M.: Razrada postupka numeričkog proračuna nasukavanja broda metodom konačnih elemenata, Zagreb 2010.

[10] Hendrik Naara, Pentti Kujalaa, Bo Cerup Simonsenb,Hans Ludolphyc: Comparison of the crashworthiness of various bottom and side structures, 2001.

[11] Posavec, D., Simon, K., Malnar, M.: Brodovi za ukapljeni prirodni plin, Zagreb, 2010

[12] www.nae.edu

[13] http://www.izvorienergije.com

[14] www.shipbuildinghistory.com